

# 先进飞机平台天线孔径综合的总体设计技术

吴琦<sup>1</sup>, 王晓明<sup>2</sup>, 孙宏涛<sup>3</sup>, 张栋梁<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191;
2. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036;
3. 中航工业集团成都飞机设计研究所, 成都 610000)

**摘要:** 电子信息系统的综合一体化是先进平台的典型特征, 天线孔径综合将众多分立的天线单元/阵列进行整合, 可显著地缩减平台天线数量, 改善平台的气动和隐身性能。天线孔径综合需要满足小尺寸、高性能、低耦合等诸多要求, 是射频综合系统的主要难点之一。以先进飞机平台为例, 介绍天线孔径综合的总体设计技术, 主要包括天线孔径综合的总体思路、电磁兼容性的考虑和典型天线样机的研制。

**关键词:** 孔径综合; 射频综合; 电磁兼容; 总体设计技术

**中图分类号:** V243.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-4080 (2021) 04-0007-07

## Overall Design Technology of Integrated Aperture Antennas for Advanced Aircraft Platform

WU Qi<sup>1</sup>, WANG Xiaoming<sup>2</sup>, SUN Hongtao<sup>3</sup>, ZHANG Dongliang<sup>1</sup>

1. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;
3. Chengdu Aircraft Design and Research Institute, China Aviation Industry Group, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** The integration of electronic information system is a typical feature of advanced platform. The antenna aperture synthesis integrates many discrete antenna elements / arrays, which can significantly reduce the number of platform antennas and improve the aerodynamic and stealth performance of the platform. Antenna aperture synthesis needs to meet the requirements of small size, high performance, low coupling and so on, which is one of the main difficulties of RF integrated system. Taking the advanced aircraft platform as an example, this paper introduces the overall design technology of antenna aperture synthesis, including the overall idea of antenna aperture synthesis, the consideration of electromagnetic compatibility and the development of typical antenna prototype.

**Key words:** Integrated aperture; Integrated avionics; Electromagnetic compatibility; Overall design technology

收稿日期: 2021-05-16; 修订日期: 2021-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61971018)

作者简介: 吴琦 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为系统级电磁兼容性设计、先进天线技术。

E-mail: qwu@buaa.edu.cn

通信作者简介: 王晓明 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机载电子信息系统电磁环境效应。

E-mail: xmw\_xdedu@163.com

## 0 引言

随着先进飞行器平台的快速发展,平台上用频设备数目与功能不断增加,装备有通信导航识别(CNI)、电子侦察对抗(ECM)、雷达、探测、测控等子系统。先进飞机平台上有限的空间与载荷被上述子系统占用了较大部分,导致平台上留给天线布局的空间极为有限,众多用于通信、导航、电子战等保障平台基本功能与先进性的天线,布局于有限且相对固定的区域内。为避免用频设备互扰,对天线间隔离度提出了更高的要求,且对平台的气动、隐身性能带来了极大的挑战。随着微波、天线、集成电路等学科领域的快速发展,飞机平台逐步将上述分立的功能系统从天线孔径、射频前端、基带处理、显示控制以及软件层面进行整合,实现射频综合<sup>[1]</sup>。射频综合系统不仅应用于飞机、舰船、车辆等先进平台,大型客机也开始逐步采用射频综合系统<sup>[2-3]</sup>。

射频综合系统的核心技术包括天线孔径综合、射频前端综合、数据处理综合和显示控制综合<sup>[4]</sup>。天线孔径综合将大量分立的天线单元按照工作频段和功能特点进行整合,在不降低系统性能的前提下尽可能地减少天线的数量。例如,美国为保障第三代战斗机FA-16正常工作,在平台上布置了60多副天线,而经过天线孔径综合设计后,FA-22战斗机仅使用了20多个天线孔径即可实现相同的功能<sup>[5]</sup>。先进飞机平台天线孔径综合的难度主要体现在平台上安装的天线孔径数量需缩减2/3,需要综合运用多项先进天线技术,才能保证天线的基本性能要求。例如,先进飞机的气动/隐身要求天线共形或内埋,如何提升天线的工作带宽或者实现天线的多频带工作,对实现天线孔径数量的缩减非常重要;将多个天线单元共孔径布置为单个天线孔径是一种重要的实现方式,但单元间距离的减小将导致严重天线耦合干扰问题<sup>[6-7]</sup>。因此,天线孔径综合被认为是射频综合系统的主要难点之一。

本文以先进飞机平台为例,介绍在天线孔径综合总体设计技术中的一些探索和思考。第1节主要介绍飞机平台天线孔径综合的整体思路;第2节介绍孔径天线综合的关键技术;针对共孔径天线结构,第3节介绍相关电磁兼容性的考虑;以通信导航识别天线为例,第4节介绍最新研究成果;第5节对本文的工作进行总结归纳。

## 1 机载天线孔径综合的整体思路

开展机载天线综合一体化设计,并将综合天线集成在飞机的外表面,为解决天线布局困难、隐身性能受限等问题提供了重要的技术手段,有助于提升平台的综合能力。因此,天线孔径综合的主要方向有两个:一是减少天线数量,用一个天线实现多个天线的功能;二是将综合化天线结构内埋于平台内部,大幅改善平台的气动与隐身性能<sup>[8-9]</sup>。

天线孔径综合的主要发展方向虽然较为明确,但整体设计实现的思路并不清晰。因此,首先对机载天线的主要类型和特点进行较为系统的整理归纳,为后续整体思路的提出打下基础。

### 1.1 机载天线类型与特点

先进飞机平台的机载和任务系统主要包括通信(含数据链)、卫星导航、敌我识别、雷达、电子战等子系统,其典型的工作频率如表1所示。机载天线不仅需要覆盖上述子系统的工作频率,还需要支撑系统主要功能和任务。因此,机载天线系统需要进行科学的布局设计,考虑天线性能要求、飞机气动性能、飞机质心位置等关键指标。当前,中大型飞机的天线布局设计形成一套较为成熟的技术体系,可将天线安装部位划分为5个区域,如图1所示<sup>[10]</sup>。其中,I区为机头区域,位于飞机前部;II区为机背区域,即飞机顶部;III区为垂尾区域(飞机尾部),部分高垂尾机型可在此布置大型天线;IV区为机腹区域,即飞机底部;

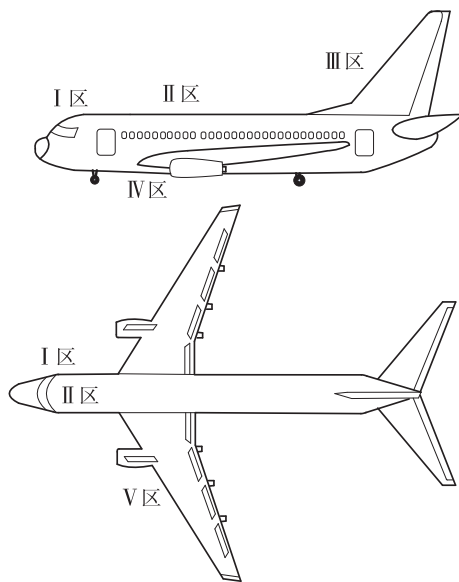


图1 机载天线布局区域

Fig. 1 Location of airborne antennas

V区为机翼前缘和上下表面区域,在飞机机翼可临机布置一些任务系统天线。

表1 机载子系统的主要功能、通用工作频段、工作特点与典型装机位置  
Tab.1 The main functions, general working frequency, working characteristics and typical installation location of the airborne subsystem

类别	子系统名称	主要功能	通用工作频段	工作特点	典型安装位置
通信	高频通信/HF Com	地面通信,机间通信	2~30 MHz	电离层反射	顶部安装
	超高频通信/VHF Com	地面通信 机间通信	30~300 MHz	全向线极化	顶部、底部安装
	甚高频通信/UHF Com	机间通信	225~450 MHz	全向线极化	顶部、底部安装
	塔康/TACAN	战术空中导航	960~1 215 MHz	全向线极化	顶部、底部安装
	卫星通信/SATCOM	卫星通信	L段: 1.53~1.66 GHz C段: 4~6 GHz S、Ku等多频段	中高增益圆极化	顶部安装
导航识别	无线电罗盘/ADF	测量飞机相对导航台的方位	100~2 000 kHz	全向定向天线	顶部中轴线安装
	全向信标/VOR	近程测向	108~118 MHz	全向线极化	尾翼顶部安装
	仪表着陆/ILS	降落引导	指点信标: 75 MHz 航向信标: 108~112 MHz 下滑接收: 329~335 MHz	全向线极化	指点信标天线底部安装/ 航向信标天线机头安装/ 下滑接收天线 尾翼对称安装
	交通防撞/TCAS	探测临近飞机飞行信息	询问: 1 030 MHz 应答: 1090 MHz	定向、全向天线	顶部底部安装
	无线电测距/DME	测量飞机与测距台斜距	询问: 1 025~1 150 MHz 应答: 962~1 213 MHz	全向线极化	下部安装
	卫星导航/GPS	接收卫星定位信号	北斗发: 1 615 MHz 北斗收: 2 492 MHz GPS: 1 575 MHz	定向圆极化	顶部安装
	无线电高度表/RA 微波着陆系统/MLS	测量飞机对地高度 引导飞机着陆	4.2~4.4 GHz 5.03~5.09 GHz	中增益线极化 全向线极化	底部中轴线安装 下部安装
雷达	气象雷达/WXR	探测前方气象目标和障碍物	9.3~9.4 GHz	定向高增益	机头安装
	火控雷达/FCR	引导武器投放	8~12 GHz	定向高增益	机头安装
电子战	雷达告警/RWR	探测雷达威胁	1~18 GHz (非固定)	定向圆极化	机身四周安装
	电子支援/ESM	探测定位来波信息	1~18 GHz (非固定)	圆极化阵列	机翼末端安装
	电子对抗/ECM	干扰欺骗 敌军通信、雷达	0.8~18 GHz (非固定)	定向线极化/双极化	机头安装或机身安装

## 1.2 天线孔径综合的整体思路

根据上述分析和整理的机载天线典型工作频段和装机位置,机载天线孔径综合整体设计思路是遵循就近原则<sup>[11]</sup>。首先,考虑天线工作频率的就近原则,将工作频率相同或相近的多副天线进行综合化设计,可以借助的天线技术主要有宽频带天线、双频/多频天线、可重构天线等。例如,

可以将多个窄带天线进行综合化设计,采用多频或宽频天线技术实现。其次,考虑天线安装位置的就近原则,将安装位置较近的天线进行综合化设计,可以借助上面介绍的宽频带、多频、可重构天线技术,也可以采用最近发展出来的共孔径天线技术。最后,需要充分考虑天线的工作带宽、增益、方向图、波束宽度、极化、辐射功率等性

能特点,出于电磁兼容性的考虑,大功率发射天线一般不与高灵敏度接收天线进行综合一体化设计。还有一些天线技术可供使用,如高增益圆极化天线可通过多个线极化天线单元使用圆极化器综合得到,再借助可重构馈电网络实现线极化/左旋圆极化/右旋圆极化等天线极化形式的调控,可实现线极化天线与圆极化天线的综合;利用天线重构技术,可以使单个天线工作在窄带或宽带,还可以在全向与定向等工作模式间改变天线的方向图,从而实现窄带天线与宽带天线的综合。

从上述分析结果并结合已有资料,机载天线孔径综合总体设计的重点区域有两个。其一为机头部位,此位置一般安装一些需要定向高增益辐射的大功率发射系统,例如雷达与电子对抗等系统,这些系统的天线尺寸较大,且需要对辐射功率有较高的承受能力,可以采用超宽带有源相控阵技术进行综合一体化设计;其二为飞机顶部,此位置一般安装一些工作在 L 频段、全向线极化辐射的天线,适用于卫星通信、卫星导航、无线电测距等系统,可以采用超宽带平面/共形振子天线技术综合。近年来,共形全向天线技术发展较快,为 L 波段天线隐身设计提供了可能<sup>[12-14]</sup>。大型飞机还可以将 VHF、UHF 等频段天线进行综合化、共形化设计。

随着新的材料、器件和天线理论的发展,还将涌现许多新的天线孔径综合技术,不断提升天线设计水平。

## 2 机载天线孔径综合的关键技术

### 2.1 可重构天线技术

可重构天线按功能一般可分为频率可重构天线、方向图可重构天线、频率和方向图同时可重构天线<sup>[15-16]</sup>。

1) 频率可重构天线:可以在一定频率范围内改变天线工作频率,但天线辐射方向图基本不变。实际实现时可以通过加载可变电抗、加载 PIN 二极管开关、改变天线尺寸与电流分布等方法来改变天线的工作频率。

2) 方向图可重构天线:天线方向图可以在全向辐射和定向辐射间进行切换,但天线工作频带基本不变。实际实现时可以通过使用特定天线结构或使用可调阻抗匹配网络,选择所需的电流分布模式与相位实现方向图可调节。

3) 频率和方向图可重构的天线:天线工作频率和方向图同时改变。可以使用天线阵列的思想,利用大量射频开关(如 MEMS 开关阵列)等将不同的天线或同一个天线的不同部分分成不同的“子阵”单元,通过射频开关阵列改变“子阵”单元的工作状态,从而实现天线工作频率和辐射方向图的重构。

### 2.2 宽频带天线技术

宽频带天线是指阻抗、极化、方向图等特性在很宽的频带内几乎不变的天线,是实现射频孔径综合的重要途径。例如,利用一副宽频带天线可以将多个窄带任务系统进行天线孔径综合,目前已经成为一种常规的设计手段。雷达、电子对抗、通信等宽带机载任务系统,工作频带内往往包含一些窄带系统,可以将这些窄带系统综合进宽带系统内。更宽的工作频带,可以承担平台上更多的任务需求,提高射频系统集成度,提高天线孔径综合的收益。但需要注意天线带宽应与收发信机的工作频带相匹配,不能过分提升天线工作带宽。与此同时,软件无线电技术的发展,也为提升射频系统与宽频带孔径综合天线的匹配工作提供了新的可能<sup>[17]</sup>。

### 2.3 共形天线技术

共形天线,不同于常规天线外立的安装方式,内埋或贴附于先进平台外表面,与平台的外形保持一致,可以很好地保证平台的气动布局与隐身性能。在共形天线的框架下,将原先分立于平台外表面的多副天线,设计为可内埋孔径综合天线,是孔径综合天线的重要发展方向。共形天线本身剖面较低,含有腔体,杂散发射水平较低,能大幅减少平台上天线间的直接辐射耦合,天线外加上天线罩之后,可有效改善天线的雷达散射截面,并有效提高内部电路对外界电磁干扰的抵抗能力。

共形天线技术一般适用于具有相对标准形状的平台中,例如平面、圆柱形、圆锥形、椭圆形等,这些平台形状能大大简化共形天线的仿真计算,因此,大量共形天线分析基于上述平台。常见的共形天线形式包括沿不同方向放置的的微带振子天线(可实现水平极化、垂直极化与双极化)、微带贴片天线(可覆盖宽带或多频带、线极化或圆极化、全向或定向)、vivaldi 天线等。

## 3 电磁兼容性的考虑

将各类无线系统综合布置在系统平台内部,需要非常注意天线之间的相互耦合干扰问题。以飞机

常用的高度表收发天线和微波着陆天线为例，其典型布局结构如图 2 所示。高度表发射天线产生的电磁信号，可能被高度表接收天线接收到，从而影响系统对飞机高度的判读，这就是所谓的同频干扰。虽然高度表和微波着陆系统并非工作在相同的频率，微波着陆接收天线同样可以拾取上述电磁信号，同样存在着电磁干扰的风险，一般称之为带外干扰。

为了进一步定量分析上述问题，表 2 给出了系统的典型射频参数。根据表 2 可以定义如下的干扰参量

$$IM(f) = P_{rad}(f) - S_{rad}(f) - ISO(f) - Sen(f) \quad (1)$$

式中， $IM$  为干扰参量， $P_{rad}$  为发射天线功率， $S_{rad}$  为发射机带外抑制， $ISO$  为收发天线间的隔离度， $Sen$  为接收机灵敏度。

表 2 高度表和微波着陆系统典型射频参数  
Tab. 2 Typical RF parameters for altimeter and microwave landing systems

天线名称	工作频率	发射功率	接收灵敏度	发射带外抑制	接收带外抑制
高度表发射天线	4.3 GHz	23 dBm	—	> 70 dBm	—
高度表接收天线	4.3 GHz	—	-100 dBm	—	> 70 dBm
微波着陆接收天线	5.06 GHz	—	-90 dBm	—	> 70 dBm

考虑到  $IM$  需要有 6 dB 的安全裕量，可以计算得到当天线隔离度大于 49 dB 时，高度表发射系统与微波着陆接收系统能够兼容工作。高度表发射天线与高度表接收天线之间的隔离度需要达到 129 dB，若使用脉冲形式的波形，可以将隔离度要求降低至 85 dB<sup>[18]</sup>。为了满足上述天线隔离度要求，需要拉大天线的距离，利用空间衰减和飞机机体遮挡等方法解决天线耦合干扰问题，如图 2 所示，高度表收发天线与微波着陆天线通常间隔 50 cm 布置。

如果要将这 3 副天线进行综合一体化设计，可以采用共孔径天线技术将这些天线直接整合，但需要注意解决天线耦合干扰问题。同时，电磁兼容性分析指明了天线隔离度设计的目标<sup>[19]</sup>。

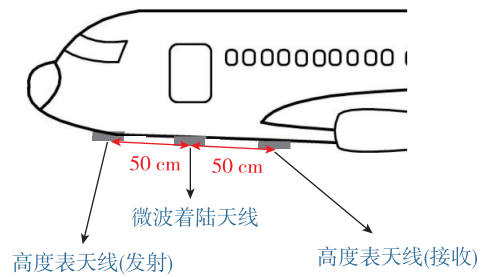


图 2 微波着陆天线和高度表天线一般安装示意图  
Fig. 2 General location of microwave landing antenna and altimeter antennas

#### 4 高度表收发天线与微波着陆天线的综合一体化设计

为了将问题简化，首先分析高度表发射天线与微波着陆天线的综合天线。通过天线电流分布的特点，利用短路探针加载耦合模式中电场比较大的位置，来达到抑制特定模式的效果，从而提升两天线之间的隔离度。该方法的原理是利用短路探针表面的 PEC 边界条件，在电场较强的位置加载短路探针，可以大大减弱探针位置的切向电场强度，以达到电场抑制的效果。

在将两天线之间距离缩减为 8.5 cm 时，通过全波仿真得到了天线在 5.06 GHz 处的表面电流分布，如图 3 所示。可以看出，在图中椭圆形标记处电场较大，因此选择在这些电场比较强的位置加载短路探针，以达到抑制电场强度的效果。在加

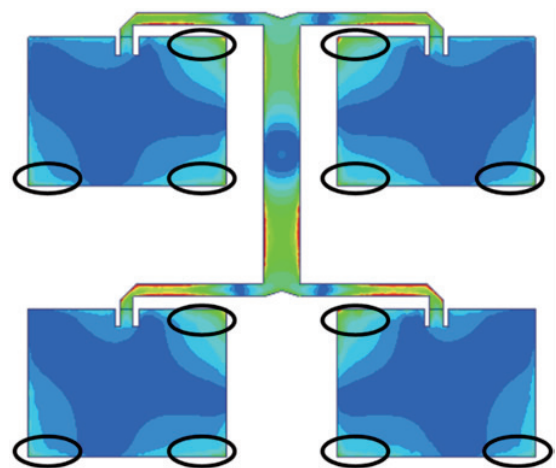


图 3 天线在 5.06 GHz 频率下的电场分布  
Fig. 3 The electric field of the antenna at 5.06 GHz

载短路探针后，高度表发射天线的谐振频率有所偏移，需要对天线尺寸进行适当微调，最终获得的天线 S 参数结果如图 4 所示。可以看出，两个天线在 5.06 GHz 下的 S<sub>21</sub> 参数有着将近 20 dB 的下降，大大提高了天线间的隔离度，验证了利用短路探针降低天线带外发射的有效性，天线的阻抗带宽略微变窄，但仍满足实际工作需要。

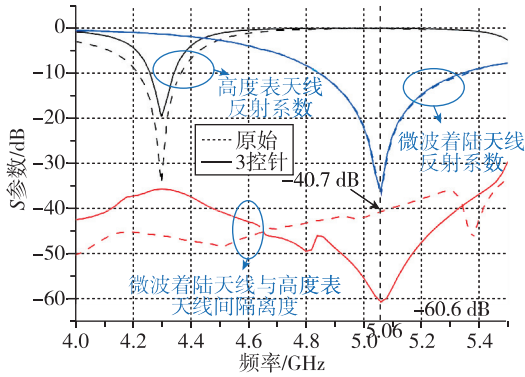
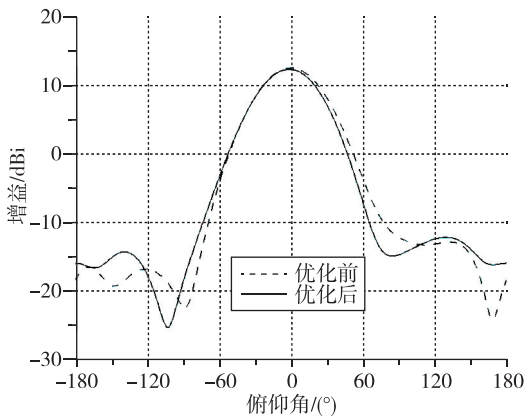
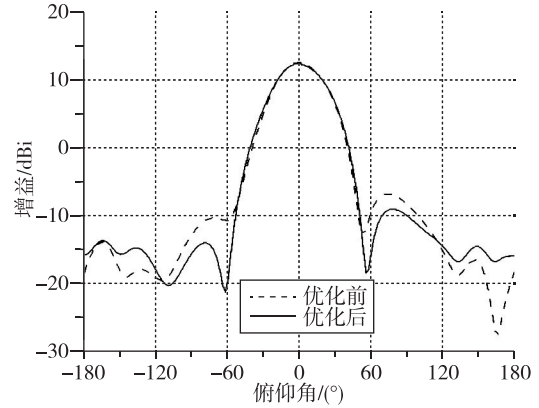


图 4 加载短路探针后，天线 S 参数仿真对比图 (天线在 5.06 GHz 的耦合由 40.7 dB 降低到了 60.6 dB)  
 Fig. 4 S-parameters of proposed antennas before and after loading shorting pins (the coupling between antennas at 5.06 GHz was reduced from -40.7 dB to -60.6 dB)

由于探针加载位置不是对称的，因此还需要分析孔径综合一体化设计后的天线辐射方向图是否存在畸变等问题。图 5 和图 6 分别给出了高度表发射天线和微波着陆接收天线在工作频段处优化前后的辐射方向。由图 5 可以看出，天线的方向图在 E 面和 H 面均没有发生明显变化，增益还略有提升，说明了对高度表发射天线加载短路探针后，天线原有的工作特性并未受到影响，甚至性能还有所提升，即在未改变天线原有工作状态的情况下实现了天线间的耦合抑制。由图 6 可以看



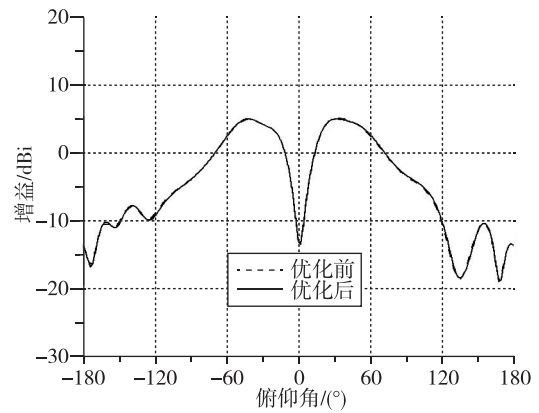
(a) E 面方向图对比



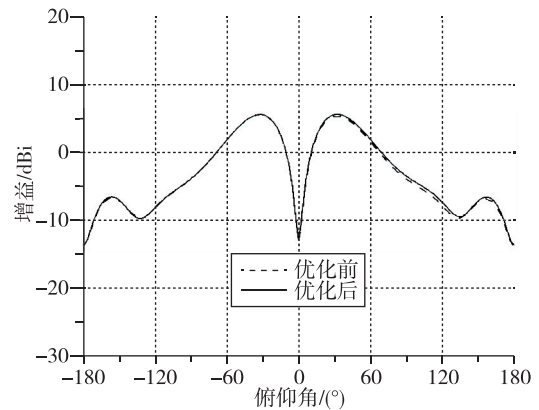
(b) H 面方向图对比

图 5 高度表天线在优化前后的辐射方向图对比 (4.3 GHz)

Fig. 5 Comparison of radiation patterns of altimeter antenna before and after optimization (4.3 GHz)



(a) phi=0°



(b) phi=90°

图 6 微波着陆天线在优化前后的辐射方向图对比 (5.06 GHz)

Fig. 6 Comparison of radiation patterns of microwave landing antenna before and after optimization (5.06 GHz)

出，由于微波着陆接收天线并未进行结构上的改变，因此天线方向图几乎没有变化，这是在预期之内的。

进一步将高度表接收天线与上述两综合天线进行综合一体化设计。由于高度表收发天线之间的隔离度要求达到 85 dB, 需要适当增大天线距离至 100 mm。此时, 高度表收发天线与微波着陆天线的间距都是 100 mm, 高度表收发天线距离达到 200 mm。通过适当的设计和表面波抑制措施, 可以达到所需的天线隔离度。

## 5 结论

天线孔径综合技术难度大、探索性强, 是射频综合系统的主要难点之一。本文对天线孔径综合可能涉及的总体技术进行了探索和介绍。以先进飞机平台为例, 本文较为系统地梳理了通信、导航、识别、雷达、电子战等机载子系统特点, 提出了孔径综合天线设计的就近原则。根据笔者的科学研究和工程实践经验, 介绍了机载孔径天线综合的关键技术。由于结构和空间限制, 天线耦合干扰问题是天线孔径综合总体设计必需考虑的问题。

为此, 本文以高度表收发天线和微波着陆天线为例, 介绍了电磁兼容性预评估给出的天线隔离度要求, 并通过合理的天线设计实现上述要求的样机研制过程。天线孔径综合技术还在高速发展中, 新的成果正不断涌现, 期待本文能够抛砖引玉, 为相关技术提升凝聚力量。

## 参考文献

- [1] 张明友. 雷达-电子战-通信一体化概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] 金德琨. 综合传感器系统——向纵深发展的航空电子综合技术[J]. 航空电子技术, 2004(4): 11-15.
- [3] Morgan M J. Integrated modular avionics for next generation commercial airplanes[J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, 1991, 6(8): 9-12.
- [4] Rich B A, Lehnerd P J, Gracia J A. Benefits and challenges of integrated sensor systems [J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, 1995, 10(9): 352-358.
- [5] 袁晓哈. 传感器射频综合技术探讨[J]. 航空电子技术, 2005, 36(1): 1-5.
- [6] 徐艳国, 胡学成. 综合射频技术及其发展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(6): 551-559.
- [7] 孙聪, 张澎. 先进战斗机对机载射频孔径系统隐身的需求及解决方案[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1472-1481.
- [8] Moir I, Seabridge A. 军用航空电子系统[M]. 吴汉平等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [9] 熊华钢, 王中华. 先进航空电子综合技术[M]. 国防工业出版社, 2009.
- [10] 陈玉东, 全力民. 机载天线及其布局设计要求[J]. 航空电子技术, 2008, 39(3): 34-38.
- [11] 吴琦, 苏东林, 金荣洪. 平面结构的超宽带振子天线理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
- [12] Nakano H, Iwaoka H, Morishita K, et al. A wideband low-profile antenna composed of a conducting body of revolution and a shorted parasitic ring[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2008, 56(4): 1187-1192.
- [13] Hong W, Sarabandi K. Low-profile, multi-element, miniaturized monopole antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2009, 57(1): 72-80.
- [14] Li M, Behdad N. A compact, capacitively fed UWB antenna with monopole-like radiation characteristics [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1026-1037.
- [15] Christodoulou C G, Tawk Y, Lane S A, et al. Reconfigurable antennas for wireless and space applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(7): 2250-2261.
- [16] Costantine J, Tawk Y, Barbin S E, et al. Reconfigurable antennas: design and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(3): 424-437.
- [17] Hall P S, Gardner P, Faraone A. Antenna requirements for software defined and cognitive radios[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(7): 2262-2270.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GJB 2273-1995 无线电高度表通用规范[S]. 2013.
- [19] 张远利, 蒋东, 胡来平. 航空电子系统综合化设计之“害”[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(2): 151-157.

引用格式: 吴琦, 王小明, 孙宏涛, 等. 先进飞机平台天线孔径综合的总体设计技术[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(4): 7-13.

Citation: Wu Q, Wang X M, Sun H T, et al. Overall design technology of integrated aperture antennas for advanced aircraft platform[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(4): 7-13.