

民用飞机远距离通信天线设计

赵健* 邬亚娟

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘要: 随着通信技术的不断发展,民用飞机的通信手段也日益更新。目前民用飞机的通信方式主要包括三种,分别为高频(high frequency)通信系统、甚高频(very high frequency)通信系统和卫星通信(satellite communication)系统。天线是通信系统设备的最后一环,其结构与性能的好坏将影响整个无线电系统的通信质量。简要介绍了高频和卫星通信天线的基本辐射原理以及工程实例。高频通信天线采用回线天线的形式,卫星通信天线采用 2×6 的相控阵天线形式,相控阵天线单元采用缝隙耦合馈电的微带贴片天线形式,最后对通信天线的发展进行了展望。

关键词: 民用飞机;通信;天线;相控阵

中图分类号: V243.1

文献标识码: A

OSID:



0 引言

天线自1887年被发明至今,已经演变出多种形式,如喇叭天线、对称阵子天线、抛物面天线和微带天线等,并广泛应用于通信、微波遥感、电子对抗和雷达等民用和军用无线电系统。天线的设计在满足如带宽、增益等基本参数的前提下,还需要综合考虑天线的波段、尺寸、重量、功率容量、工作环境和安装条件等一系列问题,因此民用飞机通信天线的形式并不相同。一方面,随着机载电子设备的增多,对天线小型化和共形的要求越来越突出;另一方面,现有通信方式越来越多,通信频率不断变高,民航通信系统也必将更加先进。因此,有必要对民用飞机通信天线的基本辐射原理和设计实例进行研究,这有助于在此基础上开展更加符合先进技术的天线设备设计。而高频通信系统和卫星通信系统凭借其通信距离远,通信全覆盖的优势已渐渐成为研究热点。因此,本文主要介绍高频和卫星通信系统的天线设计。

1 高频通信天线设计

高频通信系统,又称为短波通信系统,其工作频段为 $2.000\ 0\sim 29.999\ 9\text{MHz}$,通信频段决定了短

波通信系统具有传播距离远的特点,因此被列为远程运行(extended-range operations,简称ETOPS)重要系统清单,短波通信系统设备也被列为ETOPS重要系统监控对象和改航最低设备清单。短波通信系统同时具有抗毁性强、无需中继等优点^[1],主要通过电离层的反射实现天波传播,电离层对短波通信起着至关重要的作用^[2]。而电离层的特性受昼夜、季节、太阳活动等影响很大,因此短波通信质量对外界环境的依赖性极强。

CCAR-25-R3第25.1307(d)条要求“两套双向无线电通信系统,每套系统的控制装置可在每个驾驶员的工作位置进行操作,其设计和安装需保证一套系统失效时不影响另一套系统工作。允许使用公共的天线系统,只要表明使用后仍具有足够的可靠性”^[3]。为了保证高频通信系统的冗余,一般安装两套高频通信系统,第一套高频通信系统为必装构型,第二套高频通信系统为选装构型,两套系统共用一套高频天线,仲裁逻辑在耦合器中实现。

1.1 高频通信天线形式

根据ARINC 719^[4]第2.2.3节及第4章、ARINC 753^[5]第7章描述,高频通信天线无规定的天线形式,但为了优化整体效率,推荐使用分流/缝

* 通信作者. E-mail: zhaojian6471@163.com

引用格式: 赵健,邬亚娟. 民用飞机远距离通信天线设计[J]. 民用飞机设计与研究,2024(1):46-51. ZHAO J, WU Y J. Design of long distance communication antenna of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(1):46-51 (in Chinese).

隙天线的形式。

确定高频天线的形式需考虑以下要素：

1) 天线和飞机垂尾前缘共形,安装在垂尾前缘蒙皮内,垂尾结构前部为铝-玻璃钢蒙皮,后部为碳纤维蒙皮;

2) 工作频段为 2.000 0~29.999 9 MHz;

3) 要具备足够的功率处理能力,与之相应的高频收发机输出功率为 400 W;

4) 在工作波段范围内高频天线均能实现阻抗匹配,驻波比小于 1.3:1。

满足上述要求的高频天线形式及优缺点如表 1 所示。

表 1 可能使用的高频天线形式

天线形式	尾帽天线	回线天线	套筒天线
基本结构	垂直尾翼顶端绝缘开缝隙	类似缝隙天线,缝隙形式不同	套筒+负载阻抗
优点	功率百分数较高	与垂尾前缘蒙皮兼容性较好,损耗较小	工作频带宽、阻抗匹配易实现
缺点	垂直极化分量不均匀	对飞机结构依赖性大	功率容量较差

1.2 高频天线设计实例

某民用飞机高频通信系统天线的一个设计实例如图 1 所示,高频天线结构如图 2 所示。

该天线为回线天线形式,也可称为并馈天线形式,即在飞机垂尾前缘结构的框架内填充介质槽,槽内设计尺寸较窄的金属条(图 1 红框内尺寸较小

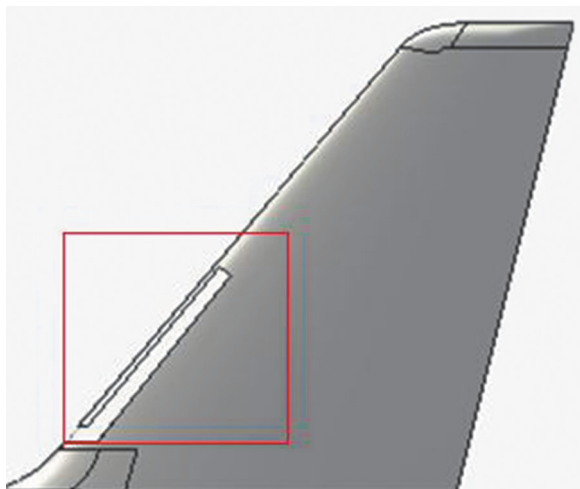


图 1 高频通信天线示意图

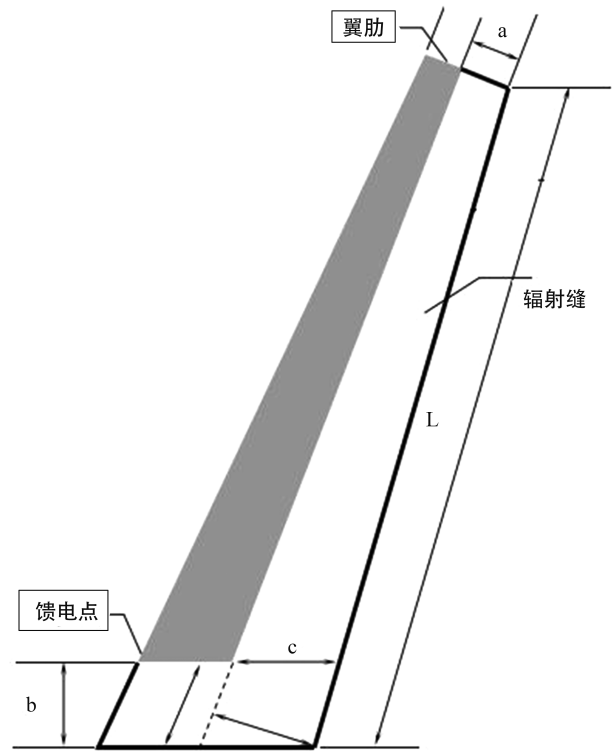


图 2 高频通信天线结构图

部分,其终端与飞机蒙皮短接)。图 2 白色部分为辐射缝,内填充介质材料,一般为聚四氟乙烯,长度 L 约为 2.5 m,形成绝缘区,天线的主要辐射则由两侧缝隙中磁流的辐射所产生,与此同时,由于缝隙的激励,机体表面尤其是垂尾,也会产生感应电流,从而影响辐射方向图。

值得一提的是,飞机短波天线的阻抗匹配设备非常重要,该设备与天线实现阻抗匹配,以实现发射功率的最大化,其设计水平直接影响到天线的调谐时间和使用效果^[6]。

2 卫星通信天线设计

卫星通信系统可实现对地球表面无障碍覆盖,通信可靠性、频率复用性都有比较明显的优势。与飞机、地面进行数据通信的卫星位于外层空间,飞机或地面发射和接收来自卫星的电磁波必须穿透电离层才能实现通信,在所有的无线电频段中只有微波波段能够满足上述要求。

2.1 卫星通信系统描述

卫星通信系统频带覆盖范围为 U、L、C、X、Ku、Ka 等波段,各个频段因波长特性均有各自优缺点,如 U 高频波段易被周围环境遮挡、C 波段易受地面

微波影响、Ku 波段和 Ka 波段易受降雨衰耗影响等。

大多数卫通系统的频段如下:

- 1) U 高频频段:400 MHz/200 MHz;
- 2) L 波段:1.6 GHz/1.5 GHz;
- 3) C 波段:6.0 GHz/4.0 GHz;
- 4) X 波段:8.0 GHz/7.0 GHz;
- 5) Ku 波段:14.0 GHz/12.0 GHz;
- 6) Ka 波段:30.0 GHz/20.0 GHz。

2.2 卫星通信天线形式

根据 ARINC781-7^[7],对卫星通信系统高增益天线形式提出了如下要求:

- 1) 天线波束应当可扫描,切换波束时,信号中断不应超过 50 μ s;
- 2) 接收频率为 1 525~1 559 MHz、发射频率为 1 626.5~1 660.5 MHz;
- 3) 极化方式:右旋圆极化;
- 4) 轴比:所有转向角,所有频率均小于 6.0 dB;
- 5) 驻波比:小于 1.5:1;
- 6) 增益:不小于 12 dBic;
- 7) 分辨率:辐射方向图相差不少于 13 dB;
- 8) 接收负载能力:60 W(单载波)、150 W 峰值包络功率(多载波)。

微带天线使用在飞行器或者地面便携式设备等大量无线设备之中,微带天线与传统天线相比具有尺寸小、厚度小、高载荷、低成本等优点,并且可以方便地与设备进行集成。其优良的抗干扰能力和抗极化失配能力,非常适合于卫星通信的远距离信号传输。

相控阵天线是一类借助于波束合成技术发展而来的新型阵列天线。为了使天线增益满足指定的要求,它将多个天线单元按照一定的规律排列起来组成天线阵列,通过控制每个单元天线的幅相参数,改变天线波束的指向,实现波束覆盖近半球空间的要求^[8]。

因此,民用飞机卫星通信天线大多采用微带相控阵天线形式。

2.3 卫星通信天线辐射原理

圆极化微带相控阵天线的设计分为圆极化天线单元设计和相控阵组阵设计。

2.3.1 圆极化实现方式

微带天线要想实现圆极化辐射,一个基本条

件就是需要在微带贴片天线中激励起空间正交、幅度相等、相位相差 90°的两个正交简并模。微带天线圆极化方法大致可以分为三类:单馈法、多馈法和多元法^[9]。圆极化实现方式对比如表 2 所示。

表 2 圆极化实现方式

天线形式	优点	缺点
基于分支线耦合器	圆极化带宽相对较宽	馈电网络复杂,端口间参数较难协调,不利于小型化
双端口串行馈电网络,十字缝隙耦合馈电	阻抗带宽及轴比带宽可达 50%	隔离度带宽很窄导致最终可获得增益很小,不实用
双层馈电网络,采用四个耦合点	阻抗带宽及轴比带宽较宽	馈电网络复杂,尺寸过大
H 型缝隙耦合馈电	可实现 10% 以上的带宽	存在空气层,剖面尺寸大
圆形串行馈电加若干十字槽	可实现 16% 以上的带宽	剖面尺寸大
数字方法控制 PIN 二极管	尺寸较小	容易影响天线馈电网络的电特性,带宽窄
L 型探针耦合馈电	带宽宽,隔离度高	实物制作复杂,实用性较差
CPW 共面波导馈电	带宽宽	平面尺寸大,不适合组阵,增益低

2.3.2 微带天线辐射原理

如图 3 所示,微带贴片的长和宽分别为 a 和 b ,并假设介质基片的厚度为 h ,且 $h \ll \lambda$,则微带贴片可以看做是一段长为 a 、宽为 b 的微带传输线,并且终端可视作开路状态,因而 b 边电压将显示出波腹状态。理想情况下,因为介质基板的厚度非常薄,可以认为沿基片厚度方向电场无变化。为便于分析,忽略贴片宽度在尺寸上的微小变化,则辐射场可认为是由贴片沿长度方向的两个开路端的边缘场产生的,将边缘场即 a 边的场分解为水平分量和垂直分量^[10],由于 $b \approx \lambda/2$,根据电磁场的传播原理,两开路端的垂直电场分量将呈现反相状态,而在水平方向电场分量方向相同因而叠加,又根据右手定则,可得微带贴片天线的最大辐射方向垂直于

贴片的方向。由此分析可得,对于微带天线的贴片为矩形形状的情况,可以等效使用两个相距 $\lambda/2$ 的同相激励的二元缝隙天线阵列。

各种微带贴片形状如图4所示,如果是其它形状的贴片如圆形贴片,则可以等效使用贴片与介质基板及接地板间的缝隙^[11]。

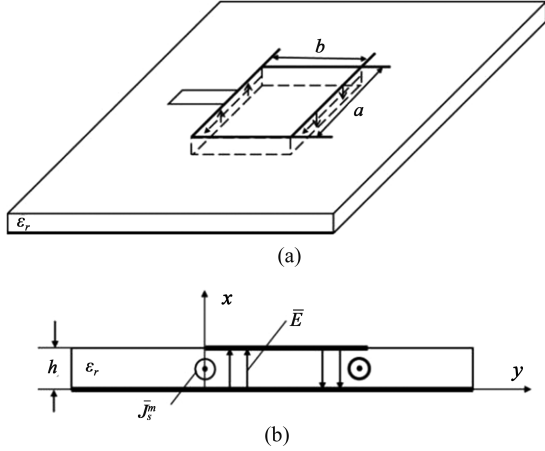


图3 微带贴片天线辐射示意图

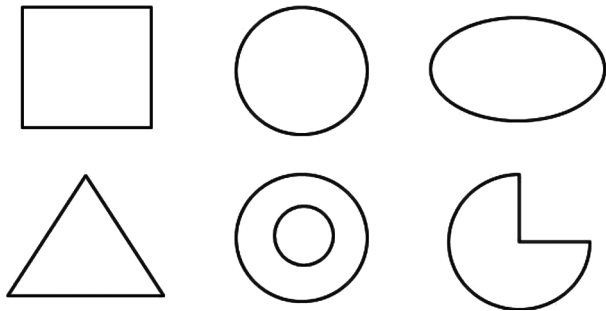


图4 微带贴片形状

2.3.3 微带天线单元设计

卫星通信微带天线单元的实例示意图如图5所示,该天线使用矩形微带贴片形式,并采用缝隙耦合馈电的形式,采用寄生贴片实现寄生辐射,增加带宽,采用两个馈电端口,可同时实现左旋和右旋圆极化,以扩展应用。

辐射贴片的尺寸与天线工作频率密切相关,贴片天线的尺寸设计比较重要,参考公式如下:

$$W = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

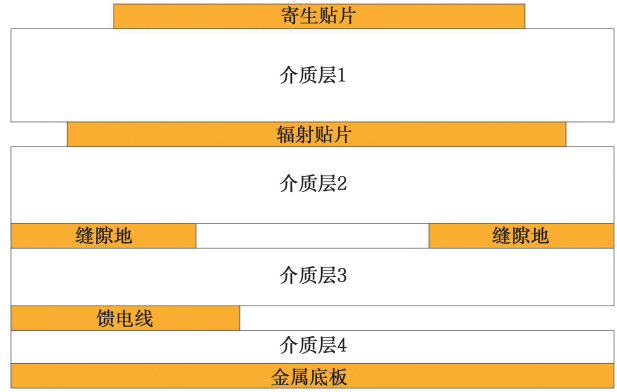


图5 卫星通信天线单元结构图

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_{re} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{re} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta l \quad (4)$$

式中: W 为辐射贴片的宽度, ϵ_{re} 为有效介电常数, Δl 为等效辐射缝隙长度, L 为辐射贴片的长度, h 为介质基板的厚度, ϵ_r 为介质基板的介电常数, c 为光速, f 为工作中心频率。

一般上述公式应用于单层贴片单层介质的设计较为准确。寄生贴片是基于增加寄生谐振的原理而增加带宽的,可以通过调整寄生贴片的尺寸增大带宽,实际仿真结果证明双层贴片的反射系数参数会出现两个谐振点,因此应当注意,寄生贴片的尺寸和辐射贴片尺寸之间不宜相差过大,以免所设计天线的反射系数参数不符合设计要求。

最终在仿真软件中设计出的天线单元示意图如图6所示。计算出辐射贴片的尺寸约为35 mm,寄生贴片尺寸较辐射贴片尺寸略小,介质厚度约为6 mm,增加馈电层结构的总体天线厚度约为

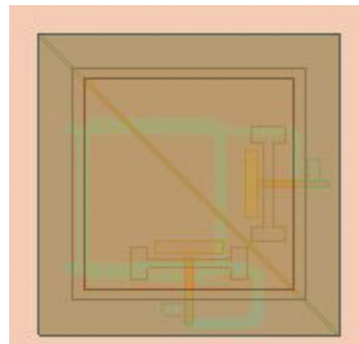


图6 卫星通信天线单元仿真示意图

11 mm。

2.3.4 相控阵天线设计

相控阵天线的性能与阵元数、阵元间距、阵元形式、阵元馈电方式和阵元激励电流五种因素有关。相控阵的阵元数目和组阵形式需参考如下设计指标：

1) 波瓣宽度

波瓣宽度是描述相控阵天线的重要指标之一，也是体现天线分辨率的重要因素之一。天线波瓣宽度的设计同样依赖于天线阵元的设计。

天线的波瓣宽度是一个立体图形，至少需要在两个正交面去描述波瓣宽度，球坐标系采用面和面去描述。在天线扫描过程中，天线的波瓣宽度随着扫描角的增大而变化，一般扫描角越大，波束宽度越宽，副瓣电平越高。一般而言，天线的扫描波瓣宽度如下公式：

$$B_s = \arcsin[\sin\theta_s + \sin(B_0/2)] - \arcsin[\sin\theta_s - \sin(B_0/2)] \quad (5)$$

式中： B_s 为扫描波瓣宽度； θ_s 为扫描角； B_0 为半功率波瓣宽度。

对于扫描角较大的 θ_s ，上式可近似为：

$$B_s = \frac{B_0}{\cos\theta_s} \quad (6)$$

2) 天线增益

天线数量增加一倍，在理想情况下天线增益会增加 3 dB，但实际上由于受阵元间互耦影响，并不能达到 3 dB。因此，需根据理论和仿真计算结果组成合适的阵列形式。

3) 旁瓣

天线方向图中，主瓣以外任何方向的波瓣均称作旁瓣，为了使天线或系统具有优良的抗干扰性能，需要天线具有极低的旁瓣。在波束扫描过程中，旁瓣会随着波束扫描角的增大而增大，因此旁瓣也是制约天线扫描角的因素之一。

在天线扫描过程中，天线间距过小以及天线剖面小会造成单元间互耦效应较大，易引起阵面和馈电网络的失配，使天线驻波带宽减小；天线间距过大，则容易产生旁瓣，旁瓣不仅占用辐射能量，且通过旁瓣探测到的目标容易与天线主瓣探测到的目标混淆。因此，需要抑制旁瓣。

使相控阵天线扫描到 θ_s 角度后不出现旁瓣的单元最大间距为：

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + |\sin\theta_s|} \quad (7)$$

根据上述指标，确定的卫星通信天线相控阵示意图如图 7 所示。

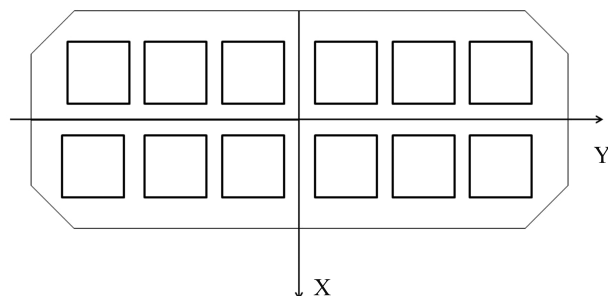


图 7 卫星通信天线相控阵示意图

3 通信天线展望

航空互联网面临数字化转型的今天，基于现有天线形式，研究新波段范围内的新型天线形式将有效破除和缓解以往波段的带宽限制。

以高频通信天线为例，高频天线的小型化，与阻抗匹配设备的一体化研究将减少高频通信系统设备的总体重量和体积，将为民用飞机重量的减轻贡献一份力。以卫星通信天线为例，卫星通信天线所使用的基本结构——微带天线从性能角度看正在向宽频带、宽波束、多频和多极化方向发展，从工程角度看向平面化、小型化、低成本、易加工方向发展。超材料的出现也正在大幅应用至卫星通信天线的设计上，天线的小型化将非常有助于天线的安装，以避免使用托盘等辅助安装设备。

4 结论

高频通信系统和卫星通信系统将作为 ETOPS 延程运行的重要系统，通信质量和效果是通信系统工程师重点研究对象。天线作为通信系统设备的最末端，性能的好坏将影响通信质量。

1) 短波通信天线常用形式有 3 种，回线天线的形式是在飞机垂尾前缘结构的框架内填充介质槽实现，选择合适的介质材料和辐射缝尺寸设计是短波天线的设计难点。

2) 卫星通信天线为相控阵天线形式，为了满足飞机安装环境，天线单元一般采用微带贴片天线的形式；接收频率（1 525 ~ 1 559 MHz）、发射频率（1 626.5 ~ 1 660.5 MHz）下的贴片尺寸约为 35 mm

左右,介质厚度约为6 mm左右,增加馈电层结构的总体天线厚度约为11 mm左右。

3) 在设计完成微带贴片天线形式后,需要根据天线增益、波瓣宽度、旁瓣等指标进行阵列设计。本文设计的2×6相控阵天线可以实现轴比小于6.0 dB且增益大于12 dBic的要求。

参考文献:

- [1] 李高飞. 短波天线的小型化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [2] 邵震洪. 太阳风暴对短波通信系统及设备的影响和应对措施[J]. 河北科技大学学报,2011,32(增刊2):36-38,42.
- [3] 郭磊,宋金泽. 民用飞机甚高频通信天线设计[J]. 民用飞机设计与研究,2019(1):40-44.
- [4] Airlines Electronic Engineering Committee. Airborne HF/SSB system; ARINC Characteristic 719-5[S]. Maryland: Aeronautical Radio, Inc., 1984.
- [5] Airlines Electronic Engineering Committee. HF data link system; ARINC Characteristic 753-3[S]. Maryland: Aeronautical Radio, Inc., 2001.
- [6] 陈亚亮. 尾帽天线研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [7] Airlines Electronic Engineering Committee. Mark 3 aviation satellite communication systems; ARINC Characteristic 781-8[S]. Maryland: SAE Industry Technologies Consortia(SAE ITC), 2019.
- [8] 韩孟飞,王小军,窦骄,等. 一种小型S波段无源相控阵天线及其在小卫星上的应用[J]. 遥测遥控,2018,39(2):63-70.
- [9] JAMES J R, HALL P S, WOOD C. Microstrip antenna[M]. London: Peregrinus, 1981.
- [10] 肖旭. 基于空间波束分解的多波束天线的设计与研究[D]. 南京:南京理工大学,2017.
- [11] 付世强. 圆极化微带天线及其在海事卫星通信中的应用[D]. 大连:大连海事大学,2010.

作者简介

赵健 女,硕士,工程师。主要研究方向:高频通信系统、卫星通信子系统。E-mail: zhaojian6471@163.com

郭亚娟 女,硕士,助理工程师。主要研究方向:音频综合子系统。E-mail: wuyajuan@comac.cc

Design of long distance communication antenna of civil aircraft

ZHAO Jian* WU Yajuan

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: With the continuous development of communication technology, the communication methods of civil aircraft are also increasingly updated. At present, there are three main methods for civil aircraft, namely high frequency communication system, very high frequency system and satellite communication system. The antenna is the last stage of communication equipment, and its structure and performance will directly affect the communication quality of the entire radio system. This article briefly introduces the basic radiation principles and engineering examples of high-frequency and satellite communication antennas. The high-frequency communication antenna adopts the form of a loop antenna, while the satellite communication antenna adopts the phased array antenna form of 2×6, and the phased array antenna unit adopts the microstrip patch antenna form of gap coupling feeding. Finally the development of communication antenna is prospected.

Keywords: civil aircraft; communication; antenna; phased array

* Corresponding author. E-mail: zhaojian6471@163.com