

基于数字孪生的天线结构优化设计



瞿淳清^{1, 2, *}

¹ 中国民用航空华东地区空中交通管理局, 设备运行监控中心, 上海 200335

² 中国民用航空华东地区空中交通管理局, 数字化实验室, 上海 200335

摘要: 为开展民航数字分析技术的系统建设, 更好地了解天线合成信号特点以及天线信号在外场的辐射特征。先根据典型空管导航设备的外场天线辐射系统, 建立数字模型, 对虚拟空间信号进行系统分析。再根据改善天线阵辐射场型的方法之一: 通过改变天线方向性的设计, 对天线的辐射特性参数进行优化, 信号质量验证及开发创新。数字模型包含多种航向信标天线阵数据库建立, 信号覆盖特性研究, 空间调制分析, 抗干扰性能验证等模型输出。根据天线的辐射性能, 以高增益天线为设计思路, 仿真得出一种优化天线阵结构模型。设计模型数据计算分析表明: 优化后的天线结构具备良好的覆盖特性, 并拥有更强的抗干扰能力, 弥补目前已产业化后广泛应用的天线阵系统, 在超宽孔径设计上的不足。这个设计方法同样可应用与其它通信专业的天线上, 为改善空间辐射信号提供有效方法。

关键词: 天线设计; 信号覆盖; 增益; 结构优化; 对数周期偶极子天线; 天线阵

DOI: 10.57237/j.se.2024.04.003

Design and Optimization of Antenna Structure Based on Digital Twin

Qu Chunqing^{1, 2, *}

¹ Equipment Operation Monitoring Center, East China Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Shanghai 200335, China

² Digitalization Innovative Laboratory, East China Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Shanghai 200335, China

Abstract: To develop the system construction of civil aviation digital analysis technology, and totally understand the charactersitics of signal synthesis of antenna as well as antenna signal in the external field. Firstly, according to the field antenna radiation system of typical ATC navigation equipment, the digital model is established and the virtual space signal has been analysed systematically. Secondly, optimized antenna radiation characteristics parameters, signal quality verification and development innovation by antenna directivity design, which is one of the methods to change the radiation field pattern of antenna array. The digital model of research mainly includes establishment of a series of localozer antenna array system database, reesarch of signal coverage characteristic, spatial modulation analysis, performance verification of anti-interference and data analysis methods. According to the radiation performance of the radiated antennas models, a kind of optimized antenna array is simulated by design inspiraiton of the high gain antenna.

基金项目: 《基于无人机的空管设备天线场型测试系统》, 华东空管局科技项目 (KJ1706), 2017-2018;

《通信导航监视设备无线电相关应用技术研究》, 华东空管局科技项目 (KJ1807), 2018-2019.

*通信作者: 瞿淳清, qcq04@163.com

收稿日期: 2024-09-01; 接受日期: 2024-11-01; 在线出版日期: 2024-12-23

<http://www.sciandeng.com>

The analysis result shows that the new designed antenna system has good coverage characteristics and stronger anti-interference ability, at the same time, this makes up for the wide aperture defects of the current widely used antenna array after industrialization. This design idea also can be applied to other kinds of communication antennas, providing an effective method for improving spatial signal.

Keywords: Antenna Design; Signal Coverage; Gain; Structure Optimization; LPDA; Antenna Array

1 引言

在仪表着陆系统 (ILS, Instrument Landing System) 中, 航向天线作为主要为飞机提供水平方位的引导信息, 通过 90Hz 与 150Hz 对载波进行 20% 的调幅来实现, 当飞机在航道左侧时 90Hz 占优, 飞机接收机会收到信号后仪表指针会提示向右, 反之亦然。以 NORMARC 公司的产品为例, 对于早期 3500 系列航向天线阵根据各机场不同地势可以选择 6 [1], 12 [2], 24 [3], 单元的天线阵, 6 单元只有单频系统, 12 单元的天线阵有单频和双频系统 (含余隙信号) 两种类型, 24 单元天线系统和之后的 7000 系列必须是双频系统, 结构上具有更宽的天线阵孔径, 从而使波束更集中。双频系统为了提供良好的抗干扰信号, 其缺点是具有更复杂的信号结构, 且设计成本高。对于单元天线而言, 早期的天线前后都会辐射信号, 可以进行双向着陆引导。但对于只能做单向引导的机场这便导致了能量辐射的浪费, 以及信号辐射的电磁污染。为改善信号质量, 在整体布局上进行了改良, 其方法为: 在天线阵背面大规模安装反射网。这种方法虽然克服了以上问题, 但缺点也非常明显, 一方面, 大规模的安装施工范围大, 使机场整平面布局受到影响; 另一方面, 天线阵背面无法安装航向信标机房, 否则建筑物会破坏辐射场型。之后, 设计的切入点转向了单元天线本身, 从改进其辐射特性入手, 进行了优化。目前使用的对数周期偶极子天线, 具有频带宽, 波束窄, 结构简单, 能量集中的特点 [4], 辐射主要集中在正前方 $\pm 27^\circ$ 范围, 增益为 26 dB, 通过单元天线的替换, 以上背向辐射的问题得到了解决。然而波束宽度不能满足长距离跑道的宽度要求, 所以各国天线生产厂商几乎都是通过相同的方法: 提高天线阵孔径提高合成信号的方向性, 增加载波频率的双频设计来增加抗干扰性。但是通过调整天线阵列的设计, 达到对改善信号整体辐射特性的提升空间是有限的。天线阵孔径的加宽和天线数量的不断增加, 对方向性及抗干扰性能的提升率越来越低,

即再次获得相同程度的提升, 造价和天线阵列尺寸呈指数级增长。

鉴于以上三种信号改良方法: 改动外围环境、改良单元天线辐射特性、改良天线阵列系统, 本文再次选择通过从改良单元天线的方向性的设计思路入手, 提出一个新型理想的水平方向辐射场型, 拟此来分析对比在天线阵合成信号上产生的效果。以数学建模为研究手段, 建立 LPDA 和理想天线方向图模型, 结合无线电原理, 远场信号合成方法, 建立天线系统的合成信号, 对全向天线, LPDA 和新型理想天线的合成效果展开分析。因全球设备生产商较多, 各系统及天线性能略有差异, 文中以 NORMARC 天线系统为例。

2 研究与方法

2.1 单元天线介绍

对于单个天线而言, 有方向性天线和全向性天线, 对于方向性天线, 有水平方向图和垂直方向图, 其方向分布函数决定了天线的增益。在航向天线系统中, 主要关注天线的水平方向图。

图一列出三种类型天线的辐射特征: 全向天线, 对数周期偶极子天线 (LPDA, Logarithmic Periodic Dipole Antenna), 新型理想天线。全向天线在 360° 全方位辐射相同强度的信号; LPDA 的辐射主要集中在正前方, 呈镜像辐射分布, 其主瓣的半宽为 $\pm 27^\circ$, 前后辐射比为 26 dB, 增益为 9~10 dBi; 新型理想天线是根据航向信标的作用而设想的一种天线, 其信号分布主要集中在正前方 $\pm 5^\circ$, 其余方位仍然保证了一定量的辐射, 从正前方 0° 往 180° 方向逐渐减小, 前后辐射比为 19 dB, 增益为 25 dBi。

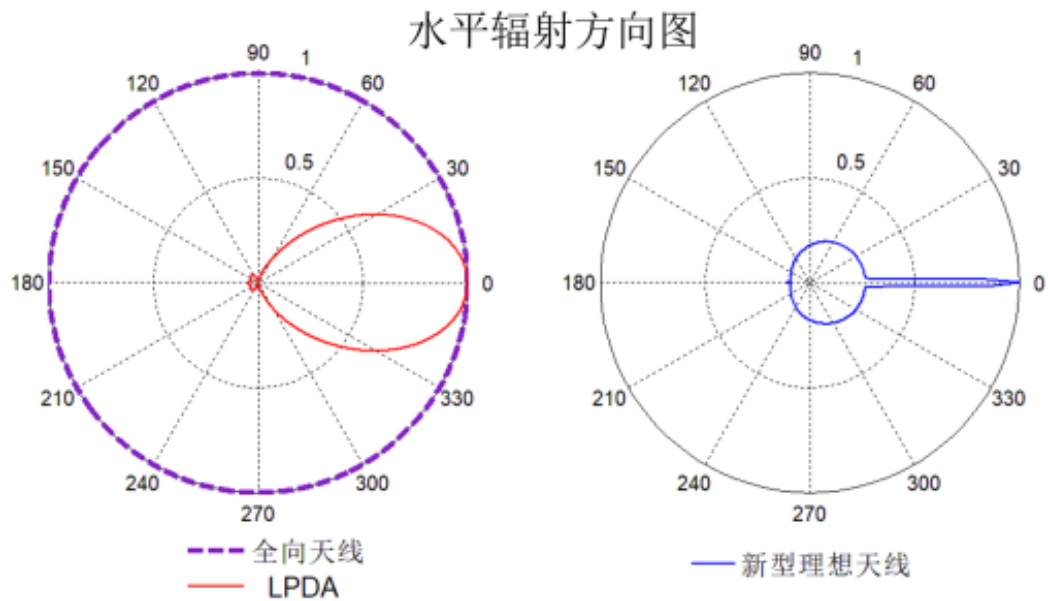


图 1 三种天线水平辐射方向图

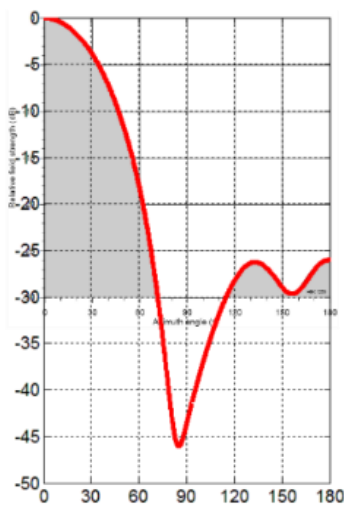


图 2 LPDA 水平辐射方向图及拟合曲线

由于 LPDA 具有频带宽，能量辐射集中，结构简单等优势，目前 THALES 公司，SELEX 公司，NORMARC 公司几乎都以此作为航向发射天线。图二为 Normarc 公司生产的 LPDA 在自由空间的水平辐射方向图，灰色部分为厂家[5]给出相对射频在 0 至-30 dB，覆盖角度在 0 至 180°区域的分布特征，可见，主波瓣位于 0~70°范围，垂直方向没有信号，背向存在旁瓣和后瓣，前后辐射比为 26 dB。从 LPDA 天线尺寸和内部馈线分布进行其严格的计算，过程十分繁琐，最终计算与上图的结果也存在差异[4]。现将厂方给出的 LPDA 分布作为标准值，根据 LPDA 辐射特性，经过数学处

理，高精度拟合，得出辐射函数 $LPDA(\theta)$ ，如图中红线所示，其覆盖特征与厂方给出的曲线完全吻合，并推算出了 70°~150°区域的分布特性。从计算上来看，这个函数有两个优点，一是偶函数，关于零点具有对称性， $LPDAh(-\theta) = LPDAh(\theta)$ ；二是 $LPDAh(\theta)$ 函数具有周期性， $LPDAh(\theta + 360^\circ) = LPDAh(\theta)$ ，这就保证了在任何方位角上取值的可靠性。对未来数学建模中出现反射面时，建立障碍物模型，进行镜像波瓣函数的可操作性和兼容性。同样，对于新型理想天线也建立了具有相同特性的分布函数 $NEWh(\theta)$ 。

2.2 天线分配单元（ADU, Antenna Distribution Unit）及天线阵的分布

在航向设备中，天线分配单元（ADU）包含了分配到每个天线的信号种类[6]，每种信号对应的幅值和相位。单频天线系统只有航道 Carrier and Sideband（CSB）和 Sideband Only（SBO）两种信号，而双频天线系统的航道 Course(COU)和余隙 Clearance(CRL)对应了四种信号。接收机通过捕获效应接收信号较强的信号，由于滤波特性，在两者（COU 和 CRL）强度相仿的情况下，两者都能显现。而对于 ADU 本身，每个通道内的相互关系是不可改变的，而四个通道之间无直接关联，它们之间的相对幅值均是可以调整的。表一列举了 12 单元航向天线阵的分配关系[2]

表 1 NORMARC 3524 12 单元双频 DIA 527A

天线序号	至中心线距离 D(m)	COU-CSB 幅度 E_c	COU-CSB 相位($^{\circ}$)	COU-SBO 幅度 E_{ss}	COU-SBO 相位($^{\circ}$)	CLR-CSB 幅度 E_c	CLR-CSB 相位($^{\circ}$)	CLR-SBO 幅度 E_{ss}	CLR-SBO 相位($^{\circ}$)
1	-11.22	11.7	0	4.9	-90				
2	-9.18	23.4	0	8.1	-90				
3	-7.14	46.5	0	12.5	-90	20	180		
4	-5.1	69	0	13.2	-90	10	180		
5	-3.06	88.1	0	10.1	-90	50	180	11	-90
6	-1.02	100	0	3.8	-90	100	0	27	-90
7	1.02	100	0	3.8	90	100	0	27	90
8	3.06	88.1	0	10.1	90	50	180	11	90
9	5.1	69	0	13.2	90	10	180		
10	7.14	46.5	0	12.5	90	20	180		
11	9.18	23.4	0	8.1	90				
12	11.22	11.7	0	4.9	90				

2.3 天线阵的信号合成

在不同的位置，航向信标的信号合成方法主要可分为远场信号合成与近场信号合成[7]。因主要研究信号覆盖特征，为计算简便，这里采用远场信号的合成方法。

2.3.1 天线对合成——信号叠加原理

根据同幅值同相位的合成原理，由表一数据，通过远场天线对合成方法[8]，以跑道中心线为对称轴，1号天线和12号天线，此二天线CSB，SBO幅值和距离跑道中心线距离相同，构成一对天线，同样，2号天线和11号天线构成第二对……总共6对天线。由信号叠加原理可知，信号分布总量可以通过每一对合成信号相叠加得到，CSB信号与SBO信号的表达式分别为：

$$CSB = \sum_{n=1}^6 2E_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi D_n}{\lambda} \sin\theta\right) / \varphi_n \quad (1)$$

$$SBO = \sum_{n=1}^6 2E_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi D_n}{\lambda} \sin\theta\right) / \varphi_n \quad (2)$$

上式中 E_n 是对应天线的相对幅度， D_n 是天线至中心线的物理距离， φ_n 为初始相位，对于CSB信号，即表格中的相位， 0° 或 180° ；对于SBO信号，为表格中小序号天线的相位加上 90° ，如：对于1号和12号天线对，其合成相位为一号天线的初始相位（ -90° ）加上 90° 结果为 0° 。

2.3.2 合成信号——方向图乘积原理

公式(1)是航向天线阵的CSB信号分布函数，相当于全向天线的覆盖分布图。对于方向性天线，根据方

向图乘积原理，其总的辐射场型 E_t 等于CSB信号分布函数与单元天线方向图的乘积，以NORMARC3525航向天线阵为例，其辐射函数为：

$$E_{total} = CSB(\theta) \cdot LPDA(\theta) \quad (3)$$

如果单元天线的场型分布发生改动，将新的归一化方向分布函数替换以上LPDA分布函数即可。

3 结果与分析

本文的场地计算以浦东机场17L跑道参数为例，载波频率 f ：110.7 MHz，对应 $\lambda = 2.71$ m，发射天线高度为 h ：3.3 m，航向天线阵后撤距离 D ：295 m。对于不同天线类型，发射功率由实际对应系统决定，一般NORMARC系统7000A设备发射功率15W，7000B设备发射功率20W。

3.1 LPDA 在天线覆盖中的作用

以NORMARC 3524天线系统[2]，共有12个发射天线，天线排列方式为等间隔排列，天线间距离为工作波长（中心频率： $f = 110.1$ MHz）的0.75倍，天线阵全长22米。具体天线分配参数如表1所示。作为NORMARC 7000A设备，双频航向天线系统，其航道和余隙发射功率均为15W。根据国标规定[9]航向信标台发射水平极化的扇形合成场，其信号覆盖区为：以航向信标天线为基准，在跑道中线延长线 $\pm 10^{\circ}$ 以内为25 Nm（46.3 km），在 $+10^{\circ} \sim +35^{\circ}$ 以及 $-10^{\circ} \sim -35^{\circ}$ 之间为17（Nm）31.5 km。

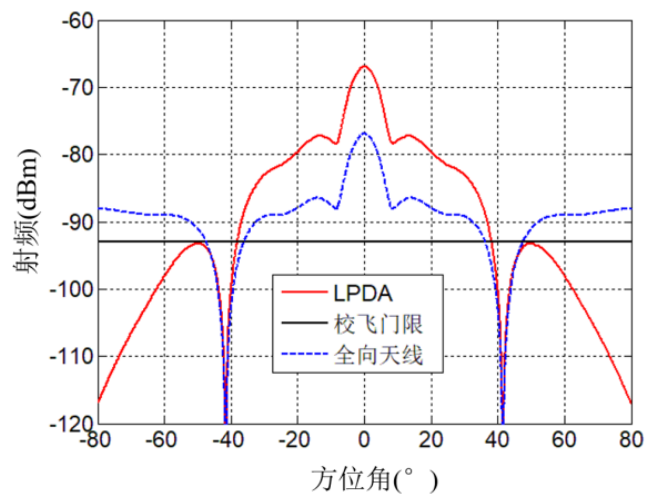


图 3 12 单元天线阵覆盖比较

根据飞行校验规则[10]，在覆盖区域（以天线阵中点为圆心，半径 46.3 km，高度 600 m）计算信号强度，得出-80°~80°区域的功率分布，如图三所示。其中蓝色曲线为 12 个全向天线合成后的信号分布，红色曲线为 LPDA 的信号分布，黑色为覆盖功率的最低门限值。可见，全向天线以及满足了覆盖要求，在±35°范围内超过门限值，但其缺点是大角度依然有信号存在，这样造成不必要的信号覆盖。在实际情况下，由于天线老化，发射传输节点信号衰减，障碍物遮蔽等原因，空间的射频分布可能有所下降。当使用 LPDA 情况下，在±35°范围内，辐射信号在全向天线阵的基础上，又将射频整体抬高，这样便有效避免了出现覆盖不足的可能性，使得航向信号覆盖更有保障；在±35°范围以外，抑制了信号的辐射，侧向辐射信号几乎可以忽略，在航向天线阵所在直线区域可以设置航向机房，同时背向信号大幅度抑制（前后辐射比 26 dB），节省了反射网的安装工程。

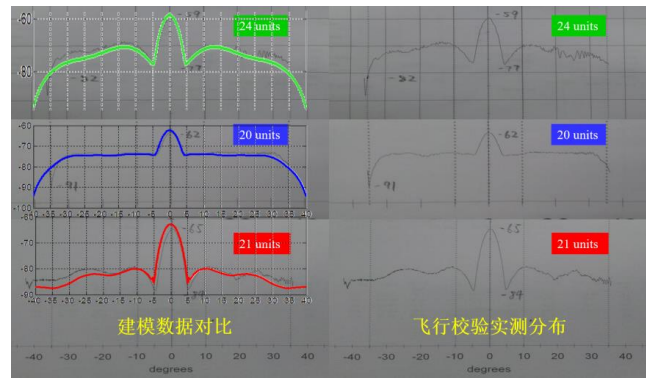


图 4 三种 LPDA 天线阵覆盖比较

为与实际信号验证比较，实际工作的 LPDA 天线阵为例，将建模与实测进行吻合性比对。图 4 列出了浦东国际机场所使用的三种航向天线阵：20 和 24 单元（Normarc 公司），和 21 单元（Thales 公司）的航向天线阵的飞行校验曲线，左图为根据飞行校验飞机的空间检测路线，建模得到的空间覆盖射频曲线，其中 20 单元和 24 单元的吻合度很高，21 单元在大角度分布上存在一定偏差，这是由于数据库使用了 Normarc 生产的 LPDA 分布曲线分析，而 21 单元为 Thales 的 LPDA，两者在水平方向的信号分布存在一定差异。

3.2 不同航向天线阵的比较

以下选择三个航向系统作为比较对象：6 单元单频天线系统[1]，12 单元双频系统[2]，和 20 单元双频系统[11]。6 单元时 NORMARC 最早期的天线系统，结构简单，天线数量最少，只辐射一个载波频率，目前这种天线基本淘汰。22 单元天线阵与 6 单元同样是 3500 系列天线，除了设计为双频捕获效应的天线系统外，增加了天线阵孔径。20 单元天线阵为 NORMARC 改进后的 7000 系列，双频设计，航道和余隙的发射功率均为 20W，为目前大型机场使用最为广泛的航向系统。

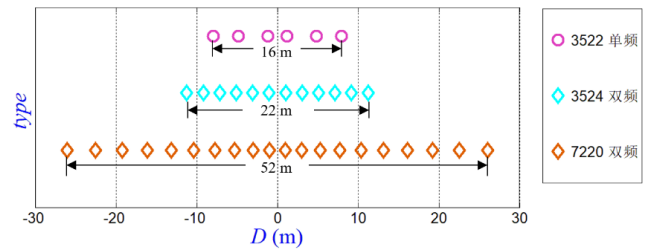


图 5 三种航向阵的位置分布

图五列出了 6 单元，12 单元，20 单元航向天线系统的天线位置分布，可见 20 单元的孔径最大，达到了 52 m，与 THALES 21 单元的天线阵接近，基本是目前最宽的天线阵，其作用是压缩合成主波束，避免机场周边的建筑物引起的反射，在长距离跑道上提供高质量的航道信号。

天线阵孔径的增大，其优点是可以合成抗干扰更强的信号，另外设计可以使得调制度差(ddd, difference in depth of modulation)有更良好的线性分布。然而，其缺点是合成信号会出现很多副瓣，小角度就会出现覆盖盲区，如图六所示，双频天线航道(COU)信号的分布，图中实线所示，无法满足信号覆盖要求，需要另外设计一套信号来弥补覆盖的缺失——余隙

(CLR) 信号, 图中虚线所示。此外, 孔径增大的另一个弊端是在基础建设上需要更多的施工区域, 保护区范围也随之增大, 天线数目上升, 系统维护保养的工作量也一并增加。

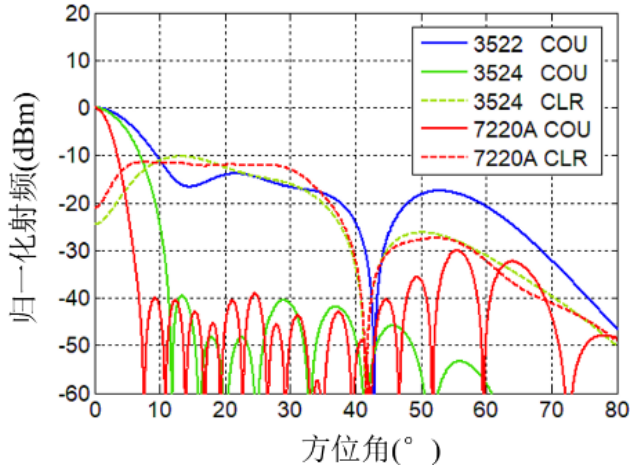


图6 三种航向天线的信号分布

结合图五和图六可以看出, 通过增加天线数量, 系统的孔径上升, 出现双频设计, 压缩了主波瓣宽度, 最终是为了增大信号抗干扰能力。

3.3 方向性优化对天线阵的作用

以上航向天线系统的优化是通过增大天线孔径来改良合成信号质量, 现在从另一个角度出发, 从天线改良天线的方向性来提升合成信号结构。

3.3.1 覆盖

根据信号合成的方法, 将公式(3)中 LPDA 分布函数替换为新型理想天线分布函数, 应用到 6 单元天线阵, 得出图 7 所示分布, 并与原来 LPDA 分布函数进行比对。由于 20 单元发射功率是 20 W, 6 单元和 12 单元发射功率以 15 W 计算, 三者的 LPDA 天线增益均为 9.5 dBi 计算, 得出的相对射频, 20 单元峰值略高一点。6 单元天线阵替换为理想天线后, 天线增益为 25 dBi, 峰值有了显著的提高, 主波瓣的宽度也有明显改善。与性能最佳的 20 单元天线阵相比, 以峰值衰减 10 dB 宽度为依据, 6 单元新型天线宽度为 5.4°, 20 单元 LPDA 天线宽度为 7.6°, 6 单元配置理想天线后超越了 20 单元天线 LPDA 的效果。

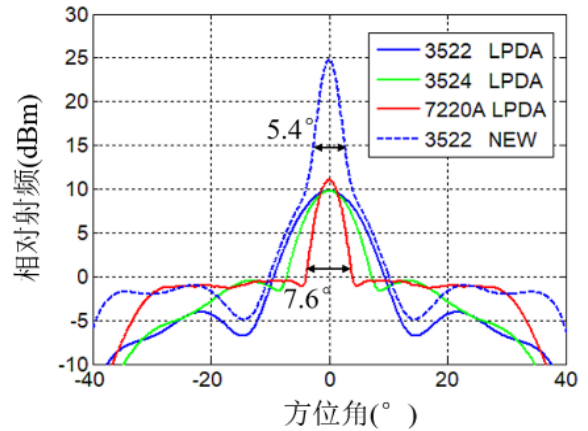


图7 新型理想天线与 LPDA 的辐射分布比较

3.3.2 抗干扰能力

表征信号干扰能力的参数——波束弯曲度 Beam Bend Potential (BBP), 表达式如下:

$$BBP = 2 \frac{SBO(\theta)}{CSB(0^\circ)} \quad (4)$$

公式(4)中 SBO 和 CSB 即公式(1)和公式(2), 根据天线阵数目不同, 选择相应的叠加数量, 由(4)式可知, 波束弯曲度有两个参数决定, 航向位置的 CSB 值, 以及 SBO 分布信号, 图中数据中 SBO 的幅度均以航道宽度 4° 为标准计算。衡量 BBP 参数的特性, 从两方面来考量, 对于航线信标而言: 一是波瓣离航道 (方位角为零度位置) 越接近越好; 二是峰值越小, 由反射引起的信号印象也越小, 说明抗干扰能力越强。图八列出了三种天线阵的 BBP 曲线, 可见天线孔径越大, 可以达到的抗干扰能力越强[6], 有一个有趣的现象, BBP 峰值对应的角度, 与孔径宽度接近反比例关系。

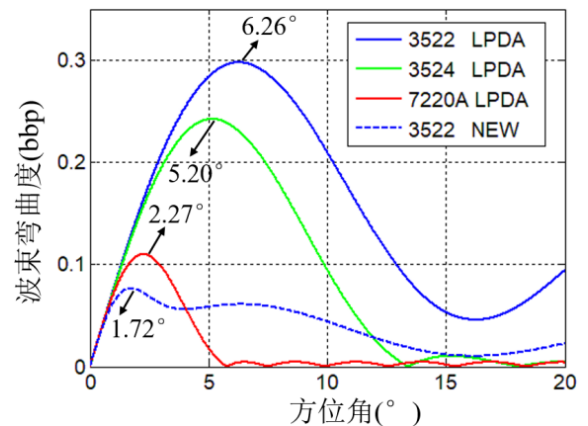


图8 新型理想天线与 LPDA 的波束弯曲度比较

对于抗干扰能力最差的 6 单元天线, 将其 LPDA 替换成新型理想天线后, 波束弯曲度质量得到大幅度改善, BBP 峰值的角度和大小均已超过抗干扰能力最强的 20 单元天线阵。

4 结语

本文通过改善单元天线的方向性为切入点, 提出了设计优化方向性的天线阵设计概念, 从而为天线阵整体辐射效果的有效改良提供了建设性的思路。通过数字孪生的方法, 将单元天线方向性优化后的效果, 来对比分析了不同类型航向天线阵的覆盖和抗干扰特性, 并与传统的全向天线和有方向性特征的对数周期偶极子天线进行实际效果的对比。当天线阵子中的全方向天线改用对数周期偶极子天线时, 信号覆盖得到了增强, 大角度不必要辐射信号得到抑制。进一步将单元天线用新型理想单元天线时, 覆盖效果比 LPDA 更为良好, 抗干扰能力也得到了明显的提升。将新型理想的单元天线应用到 NORMARC 最老式的 6 单元单频系统上, 达到的效果可以超越目前性能最佳的 20 单元的对数周期偶极子天线系统。可见改良天线方向性的设计理念, 对于生产商, 可以减小天线阵的设计成本; 对于使用和运行维护部门, 可以降低系统操作难度, 减小维护工作量。

5 创新点

1. 通过数字孪生, 建立天线辐射模型, 提出改善单元天线的方向性, 从而大幅度提升航向天线阵性能。
2. 通过数学拟合方式, 实现高精度, 360°全方位 LPDA 方向图函数, 并将函数集成于航向天线阵建模计算中加以应用。
3. 提出一个理想天线方向图, 从单元天线的性能

提高入手, 用最老式的单频航向天线阵与目前使用广泛, 性能极佳的双频航向天线以极端方式对比, 旨在说明方向性有效改良后, 天线阵覆盖, 抗干扰能力前者顿超后者。方向性改良设计避免了价格高, 天线数目多, 设计复杂的双频系统, 全面简化航向天线系统配置。

参考文献

- [1] NORMARC. NORMARC 3522 Instruction manual [M]. NORMARC, 2001.
- [2] NORMARC. NORMARC 3524 Instruction manual [M]. NORMARC, 2003.
- [3] NORMARC. NORMARC 3525 Instruction manual [M]. NORMARC, 2007.
- [4] 张海祥. 对数周期偶极子天线的建模与仿真 [J]. 专题技术与工作应用, 2009, Vol. 39, 42~44 页。
- [5] NORMARC. 7000B Training Manual 24036-042 [M]. 2012.
- [6] 瞿淳清. 三种双频航向天线系统辐射信号比较 [J]. 航空电子技术, 2017, Vol. 2, 11~17 页。
- [7] C. Q. Qu. Research on Signal of Field Monitor of 7220A Localizer Beacon Subsystem of ILS [J]. Open Journal of Antennas and Propagation, 2015, 3, 37-50.
- [8] 苗强等仪表着陆系统建模与仿真 [J]. 火力与指挥控制, 2009, Vol. 34, No. 6.
- [9] 中国民航总局航行司. 国际民用航空公约附件 10 [S]. 北京. 中国民航总局航行司, 1987.
- [10] 中国民用航空总局. 飞行校验规则 [S]. 中华人民共和国民用航空行业标准 MH2003-2000, 2000.
- [11] NORMARC. NORMARC 7220A Instruction manual [M]. NORMARC, 2012.