

基于数字孪生的导航球面信号覆盖分析与研究



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: 本文研究导航设备在一定飞行高度层下, 具有等高层特性信号的覆盖情况。利用数字孪生的设计思想, 对真实的航向天线阵列系统进行仿真建模, 建立水平方向, 垂直方向, 以及三维空间的电磁辐射模型。在广域飞行范围内, 二维平面飞行与等高面曲面存在明显的差异。考虑地球球面特征的几何形态, 修正了地球曲率引起的几何误差以及信号偏差, 建立四个飞行高度层 ($h=200\text{ m}, 400\text{ m}, 600\text{ m}, 800\text{ m}$), 逐一分析了飞机在进近飞行区域的覆盖情况, 并按飞行校验的信号强度和覆盖范围对比。结果表明: 在进近高度上, 航向信标提供的电磁信号足够满足覆盖要求。高度层越高, 覆盖范围越大, 在低高度层 $h=200\text{ m}$ 以下, 在不同方位角上逐渐不能满足要求。球面信号特征的分析手段为后续导航覆盖分析提供了有效研究方法。

关键词: 航向天线; 数字孪生; 球面覆盖

DOI: [10.57237/j.cst.2024.04.002](https://doi.org/10.57237/j.cst.2024.04.002)

Analysis on Spherical Signal Coverage of Navigation 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: This paper studies the signal coverage of navigation equipment with equal high-level characteristics at a certain flight altitude, namely in contour plane. The real localizer antenna array system was simulated by the design of digital twin. The horizontal pattern and the vertical pattern of antenna array were researched consequently, the space electromagnetic radiation model was established. When aircraft is fling in wide area, there are obvious differences between two dimension plane and contour plane. Considering the geometric shape of the spherical characteristics of Earth, the geometric error and signal deviation caused by the Earth curvature were revised. Four contour plane flight levels ($H=200\text{ m}, 400\text{ m}, 600\text{ m}$ and 800 m) were established. The circumstances of coverage in the aircraft approach area is analyzed one by one. Also, four conditions were compared with fight checking by signal strength and coverage. The results showed that the electromagnetic signal provided by the localizer beacon is enough to meet the coverage requirements at the approach altitude. The higher the altitude, the larger the coverage zone. Under the low altitude $H=$

*通信作者: 瞿淳清, qcq04@163.com

200m, it starts to appear coverage insufficient in different azimuth angles. Consequently, this analysis method of spherical signal features provides an effective research method for subsequent navigation coverage analysis.

Keywords: Localizer Antenna; Digital Twin; Spherical Coverage

1 引言

在仪表着陆系统 Instrument Landing System (ILS) 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 系列均为双频系统, 结构上具有更宽的天线阵孔径, 从而使波速更集中, 适用于大型机场, 尤其是 4 km 以上的跑道, 提供优质的航道宽度, 且信号有更强的抗干扰能力。宽孔径天线阵的优点显著, 但天线数量多, 结构复杂, 维护工作量也随之上升, 此外系统的价格也随之提高。目前华东地区大型国际机场会选用超宽孔径的 NORMARC 公司 20 [4-6] 单元天线阵, 以及 THALES 公司 21 [7] 单元天线阵, 多数中小机场会选择价格适中的 NORMARC 公司 16 [8, 9] 单元天线阵、12 [10, 11] 单元天线阵, 或者是 THALES 公司 13 单元天线阵。

本文选择前应用广泛最为广泛, 技术成熟度极高的生产商 NORMARC 公司, 近些年二类航向产品, 7000 系列中使用的 16 单元天线阵 (7216 系统双频天线阵列) 为例, 通过对单元天线, 天线阵列, 建立数学模型, 并针对地面曲面建立球形模型, 消除曲率半径引起的误差, 进行电磁信号仿真分析, 对射频信号覆盖特征, 在不同飞行高度层展开讨论。

2 航向信标介绍

2.1 7216 天线阵

Normarc 公司设计生产的 7216 航向天线阵, 利用 16 个相同的对数周期偶极子天线, 架设到一定高度, 每个天线与跑道方向相同, 天线阵列与跑道方向垂直的

横向排布, 形成辐射集中的空间信号。在跑道中心线附近区域 ($\pm 5^\circ$ 以内) 存在极强的载波 Carrier and Side bands (CSB) 信号, 从而有效到达了抗扰人能力, 防止附近大型建筑 (如航站楼, 场内油库等) 因信号反射等多径效应而导致的信号干扰。同时, 载波信号的双频设计, 又能通过余隙 Clearance (CLR) 信号来满足大角度 ($\pm 35^\circ$ 以内) 范围的信号覆盖, 从而达到国际民航组织的规范要求 [7]。

2.2 天线分配单元 Antenna Distribution Unit (ADU)

2.2.1 ADU 基本介绍

天线分配单元是航向天线阵设计的关键部分, 是一款航向天线阵列产品的核心技术所在。其设计的科学性和合理性直接决定了空间信号分布的质量。以下给出航向信标 7216 天线分配单元 (ADU) 的具体信息 [12], 包含每个天线距离天线阵中心位置的距信息, 两个航道信号: COU-CSB 和 COU-SBO 的信号相对幅值以及相对相位分布, 两个余隙信号: CLR-CSB 和 CLR-SBO 的信号相对幅值以及相对相位分布。总共包含 9 个项目, 1 个位置信息和 8 个馈电信息。

其分配单元型号为 DIA 1784A, 另外, 在天线阵后方除了 ADU 机箱以外, 还有监控单元 Monitoring Combining Unit (MCU) 机箱, 其型号为 MOA 1778A, 从发射天线截取信号, 处理后用于监控。

根据馈电信息和距离信息, 以及对数周期偶极子天线 [13] 的分布特性, 可以得出天线阵在远场情况, 水平方向上 360° 全方位辐射分布。

2.2.2 ADU 信号分布规律阐述

位置信息给出每个天线到中心位置的距从表 1 可知, 天线阵单侧最远距离是 19.23 m, 即整个天线阵全长约 38.5 m, 对于每一个天线而言, 面向天线阵, 左

侧为正，右侧为负。

馈电信息详细列出了分配到每个天线的信号种类，以及对应信号的幅值和相位。对于 CLR-CSB 信号，1 号和 16 号天线没有这个信号成分。

幅度信息：在 COU-CSB 信息列中，7 号至 10 号天线的幅值最大，以它们的幅值为参考值，其它三个信号，COU-SBO，CLR-CSB 和 CLR-SBO 都是以它们的相对数值，普遍规律是，天线越靠两边，CSB 信号幅度越低。值得注意的是，对于 CLR-CSB，8 号天线和 9 号天线，它们的信号比基准值还要高，是基准值的 184.8%，而 CLR-CSB 的主要信号能力集中在 7 号至 10 号天线，外侧六对天线的信号比 COU-CSB 还小。COU-SBO 的信号分布近似于 M 形，中间天线和两侧天线的幅度小，而 4 号和 13 号天线信号幅度最大。

相位信息：同样，相位也是具有相对性，以 COU-CSB 的 8 号天线为基准值，所有 COU-CSB 与其相同，而 CLR-CSB，只有 8 号和 9 号天线与其同相位，其余天线相位均与之反向。对于 COU-SBO，半数的天

线，1 号至 8 号相位延迟 90°，另一半的天线，9 号至 16 号，相位超前 90°。对于 CLR-SBO 信号，相位分布更为复杂，1 号至 4 号天线超前 90°，然后发生反转 5 号至 8 号天线滞后 90°，9 号至 12 号再次超前 90°，13 号至 16 号天线滞后 90°。COU-SBO 与 CLR-SBO 相位分布的相同点，是 1 号至 8 号天线的分布与 9 号至 16 号天线的相位相反，从而实现等幅值，反相位的设计特点，达到航道线上，合成信号幅值为零。而对于 COU 信号，则是等幅值，同相位的设计，达到中间航道位置覆盖信号最大的目的。COU-CSB 的每一对天线，1 号和 16 号，2 号和 15 号，3 号和 14 号……8 号和 9 号，都在不断叠加中间位置的信号强度，从而到达中间信号强，两个覆盖信号弱的效果。CLR-CSB 信号正相反，8 号天线和 9 号天线提供大角度的覆盖，其余天线的合成信号将中间位置的 CLR 信号削弱，从而到达旁瓣覆盖的目的。中间位置靠 COU 信号产生作用，两侧位置靠 CLR 产生作用，这就是双频覆盖的设计特色，目的是为了增高抗干扰能力。

表 1 NORMARC 7216 16 单元双频 DIA 1784A

天线 序数	至中心线 距离 D(m)	COU-CSB 幅度 Ec	COU-CSB 相位(°)	COU-SBO 幅度 Ess	COU-SBO 相位(°)	CLR-CSB 幅 度 Ec	CLR-CSB 相 位(°)	CLR-SBO 幅 度 Ess	CLR-SBO 相 位(°)
1	-19.23	9	0	4.37	-90			0.78	90
2	-16.09	18	0	6.33	-90	4.32	180	1.46	90
3	-13.13	37	0	7.96	-90	10.55	180	1.02	90
4	-10.34	60	0	8.56	-90	16.17	180	0.78	90
5	-7.73	80	0	7.79	-90	28.11	180	2.39	-90
6	-5.3	93	0	5.99	-90	10.7	180	3.56	-90
7	-3.04	100	0	3.6	-90	69.74	180	14.1	-90
8	-0.95	100	0	1.11	-90	184.8	0	30.98	-90
9	0.95	100	0	1.11	90	184.8	0	30.98	90
10	3.04	100	0	3.6	90	69.74	180	14.1	90
11	5.3	93	0	5.99	90	10.7	180	3.56	90
12	7.73	80	0	7.79	90	28.11	180	2.39	90
13	10.34	60	0	8.56	90	16.17	180	0.78	-90
14	13.13	37	0	7.96	90	10.55	180	1.02	-90
15	16.09	18	0	6.33	90	4.32	180	1.46	-90
16	19.23	9	0	4.37	90			0.78	-90

2.3 空间信号合成

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[14]。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 水平方向的信号合成

通过远场天线对合成方法[9]，以跑道中心线为对

称轴，由表中可知，1 号天线和 16 号天线，此二天线 CSB 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 15 号天线构成第二对……总共 8 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，16 个天线在水平方向 CSB 信号随方位角变化的表达式为：

$$CSB(\theta_h) = \sum_{n=1}^8 2E_n \cos(\frac{2\pi D_n}{\lambda} \sin \theta_h) / \varphi_n \tag{1}$$

其中 D 到中心点的距离, λ 为发射信号的波长, E 为馈电幅度, φ 为馈电相位, θ_h 为方位角。

7216 天线阵的水平辐射方式如图 1 红线所示, 由双频设计, 跑道正前方, 约 $\pm 5^\circ$ 内为航道信号 Course

CSB 占主导, 波瓣具有良好的抗干扰能力, 为良好的航道 ddm 线性分布提供保证, $\pm 35^\circ$ 以外由余隙信号 Clearance CSB 占主导, 提供大角度信号覆盖。

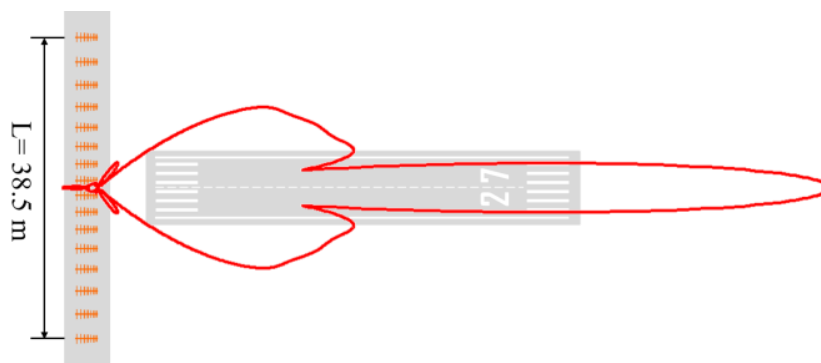


图 1 航向信号水平方向辐射图

2.3.2 垂直方向的信号合成

在仪表着陆系统中, 航向信标辐射波为水平极化, 当信号经地面发射后, 相位发生 180° 翻转, 垂直方向的信号由天线的直射信号与地面反射信号共同作用。在平整地面上, 仰角为 0° 时几乎没有信号, 随着仰角的抬高, 合成信号开始增加, 到一定角度又开始减小, 形成一个波瓣, 周而复始。一般航向信号由最接近地面的波瓣 (即第一波瓣) 提供, 之后的波瓣是不需要的, 所以对数周期偶极子天线本身在垂直方向具有一

定的收敛性。波瓣数量及第一波瓣的最大值角度均与天线高度有关, 其关系如公式 2 所示:

$$CSB(\theta_v) = 2 \sin\left(\frac{2\pi h}{\lambda} \sin \theta_v\right) \quad (2)$$

其中 h 是天线高度, λ 为发射信号的波长, θ_v 为仰角。天线越高, 波瓣数目越多, 第一波瓣的仰角越低, 对于天线高度为 3 m 时, 第一波瓣最大值对应的仰角约为 12.5° 。

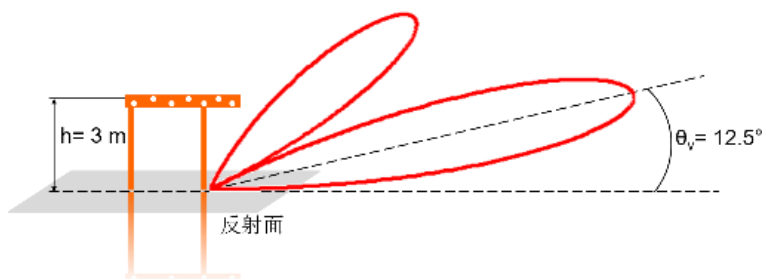


图 2 航向信号垂直镜像合成

3 基于地球曲率的高度误差修正

在实际飞行中, 尤其是广域情况下, 由于地球的曲率半径并非无限大, 是一个有限值 ($r \approx 6370 \text{ km}$), 对于飞行的高度与具体点对应的高度会存在一点的差异, 以下具体讨论飞行的高度和天线位置高度的关系。

3.1 覆盖高度

对于航向天线, 建立坐标计算的高度, 是与地球表面平行的直线, 然而对于飞机而言, 当在某一确定高度飞行时, 其飞行轨迹是略大于地球半径的弧线, 直线与弧线在天线位置是重合的, 飞机离航向天线越

远，高度的间隔就越大。另外，两者的距离表征也存在一定的差异，前者是直线，后者是弧线，距离越大，形成的距离误差也会增加。

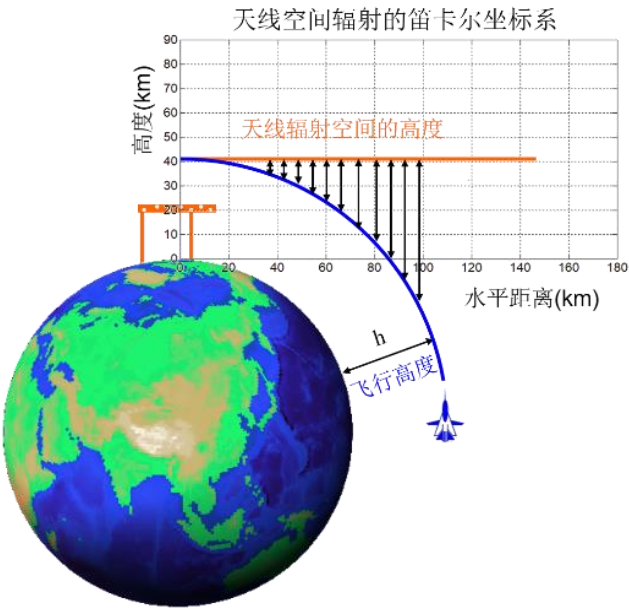


图3 飞行高度和天线坐标高度的关系示意图

3.2 坐标转换

在计算飞机覆盖时，需要将空间位置到航向天线的坐标与飞机定位的坐标建立联系，将实际的飞行曲面上，某接收点 P_R 到发射点 P_T （天线所在位置）的飞行高度（ h ）和弧长距离（ d ），转换成天线所在位置的笛卡尔坐标对应的高度（ D_a ）和距离（ H_a ），代入信号分布函数进行计算。

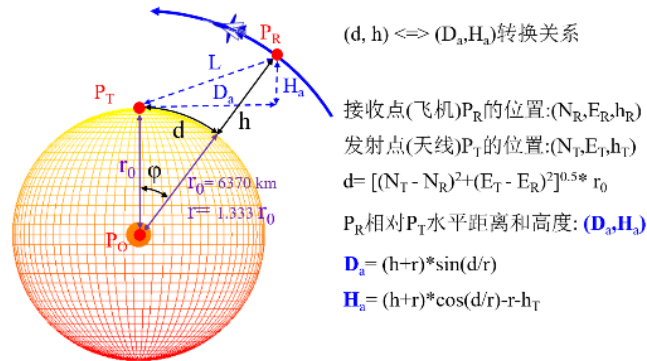


图4 直角坐标与圆弧转换关系

3.3 误差论证性分析

由图 4 中给出的转换关系（详细情况文中不再赘

述），可以精确计算在不同高度层飞行形成的距离误差和高度误差，文中以 30 m，300 m，600 m 三个高度层为例进行分析。

3.3.1 距离误差

对于不同高度层，当飞机距离天线不同距离时，产生的距离误差均不等。图中横轴距离为笛卡尔坐标，即图 4 中的 D_a ， ΔD 为 d 与 D_a 的差值。高度层越低，距离误差越大，当高度层增高，对于 600 m 高度层，如图中绿线所示，在 150 km 内是 d 较大，150 至 200 km 之间 d 与 D_a 接近，200 km 之后差值越来越大。

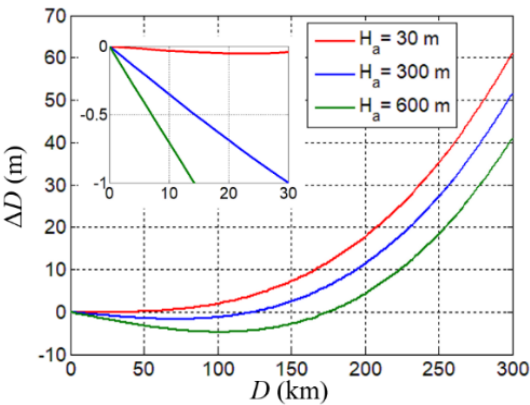


图5 不同高度层距离误差曲线

3.3.2 高度误差

对于远距离形成的高度误差，图 6 列出了 30 m 高度层与 300 m 高度层的高度误差曲线， ΔH 为 h 与 H_a 的差值。在 30 km 范围内，两者几乎重合，说明高度误差不依赖与高度层。距离天线 10 km 位置，高度误差约为 7 m，而距离误差，如图 5 插图所示，三个高度层的最大值不到 1 m；在 20 km 位置，高度误差约为 23 m，30 km 位置的高度误差超过 50 m，而对于距离误差，在 50 km 处，误差不到 5 m，说明地球曲率形成的高度误差远大于其形成的距离误差。

表 2 不同距离的的误差情况

距离	高度误差	仰角误差	射频误差
25 km	37 m	0.084°	0.23 dB
30 km	53 m	0.101°	0.27 dB
50 km	147 m	0.169°	0.45 dB
100 km	589 m	0.337°	0.87 dB
200 km	2355 m	0.674°	1.66 dB

另外, 由天线垂直方向的信号合成可知, 不同高度与辐射强度有强烈的依赖关系, 表 2 给出了不同距离下的形成的高度误差和对应的仰角误差, 其射频误差以 3 m 高的航向天线阵在 3° 仰角为基准比较的差值。由此可以得出两个结论: 一是在 200 km 范围内, 距离与仰角误差、射频误差呈正比例关系。参考 25 km, 50 km, 100 km, 200 km 四个数据, 距离翻倍, 对应误差随之翻倍, 距离越远, 误差越大。二是大距离情况下射频的误差, 达到了 dB 量级, 直接影响到距离的覆盖范围。由此, 考虑地球曲率对于高度形成的误差修正是有必要的。

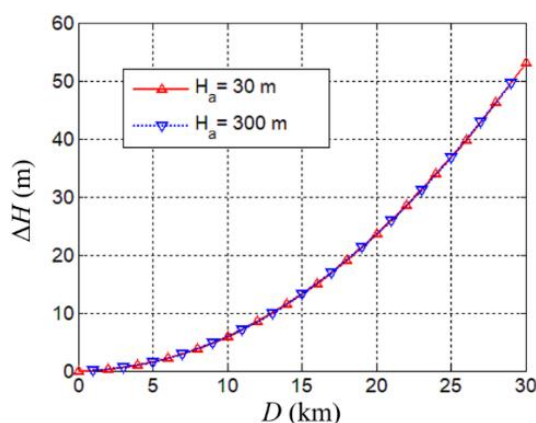


图 6 不同高度层各自的距离高度误差曲线

4 高度层覆盖分析

对于覆盖范围与发射参数有关, 文中使用的具体参数如下: 载波频率 f : 110.1 MHz, 对应波长 λ : 2.72 m, 发射天线高度为 h : 3.0 m, 航向天线阵后撤距离 D : 300 m, 发射功率 P : 20 W。对于在指定高度的覆盖特征, 与天线阵在水平方向的覆盖区域会有所不同, 因为在不同距离, 仰角是变化的, 然而天线在垂直方向的分布又依赖与仰角, 所以即便忽略球曲率造成的距离偏差, 也不能将等高层的覆盖形式等同于水平方向的覆盖分布形状。

4.1 航向信号在飞行校验程序中的覆盖分析

由国际民航组织[7]附件十, 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

线中心点为基准, 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)。结合飞行校验规则[15], 覆盖强度 -93 dBm 以上。现以 600 m 飞行高度层进行研究, 由建模计算, 给出在理想情况下方圆 100 km 范围, 7216 航向天线阵的覆盖特征, 如图 7 所示。其中红色扇形区间为必须满足的覆盖区域, 可见, 在 $\pm 35^\circ$ 方向上, 航向信号的覆盖足够满足要求, $\pm 40^\circ$ 以外, 覆盖信号得到有效抑制。然而, 在天线阵背向航道上, 依然有 40 km 以上的覆盖信号, 使得背向引导依然有实现的可行性。

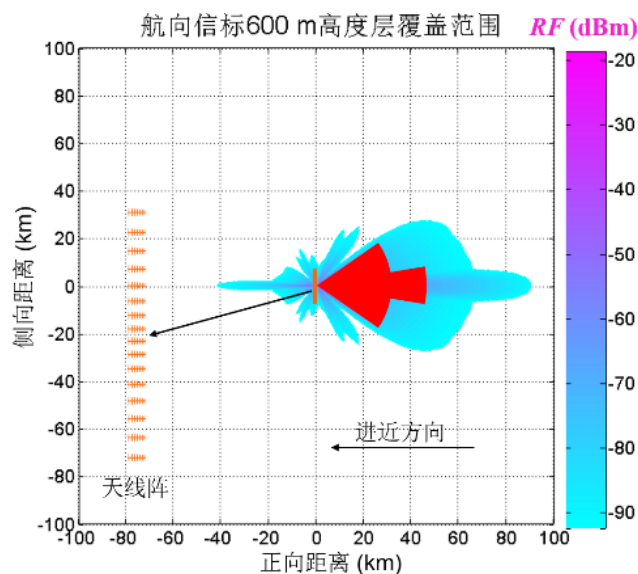


图 7 7216 天线阵 600 m 高度层覆盖特性 (俯视图)

4.2 不同高度层覆盖比较

为进一步的获悉飞行高度 (600 m 高度) 空域内的覆盖情况, 以不同高度分层, 在半径为 100 km 范围内, 逐一对 200 m, 400 m, 600 m, 800 m, 四个高度层进行有效覆盖 (-93 dBm) 计算, 结果如图 8 所示。对于 800 m 高度层, 天线正前方覆盖达到 100 km, 覆盖区域超过了 600 m 高度层, 随着高度层依次降低, 覆盖范围不断缩小, 当降至 200 m 高度层, 正前方覆盖仅为 50 km, 在 $3^\circ \sim 10^\circ$, $30^\circ \sim 35^\circ$, 两处已达不到覆盖要求。

可见, 飞行的高度层对有效信号覆盖范围的依赖性很强, 在飞行过程中, 需要严格按照指定的高度层进行作业。

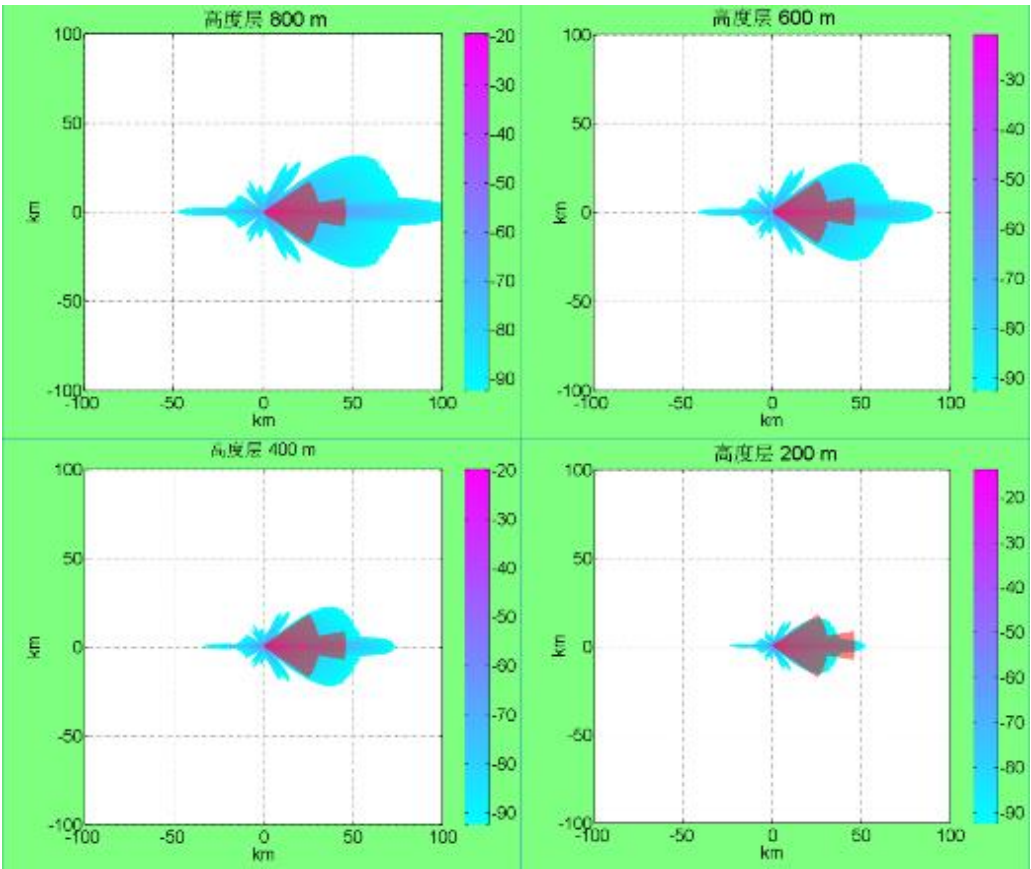


图 8 不同高度层覆盖范围比较

5 结语

本文通过以 Normarc 公司生产的 16 单元宽孔径 7216 航向天线阵列以数字孪生进行以下方面研究。一、根据天线特性建立数学模型，研究了水平方向和垂直方向的信号辐射特征。二、对地球曲率形成的几何误差，建立误差修正模型，并对距离误差和高度误差进行论证性比较分析。三、建立等高层飞行模型，计算出基于飞行校验程序的有效覆盖区域，并探索了不同飞行高度的信号覆盖特性。可以看到 16 单元天线阵的设计，能够很好的达到覆盖要求，在飞行主区内跑道中心线所在径向上有足够的信号强度。

通过数字孪生分析实体天线的信号辐射的方法可以应用到更多的导航设备天线中，后后续航向信标，下滑信标，全向信标等不同功能的导航天线阵，对应射频强度覆盖，调制度差参数的分布特征，调幅调频道信号的空间辐射特征提供有力的分析方法，并为后续空间场型方面的研究奠定了坚实的理论基础。

参考文献

[1] Normarc. Normarc 3522 6-Element Localizer Antenna System [M]. Normarc, 2001.

[2] Normarc. Normarc 3524 12-Element Localizer Antenna System [M]. Normarc, 2003.

[3] Normarc. Normarc 3525 24-Element Localizer Antenna System [M]. Normarc, 2007.

[4] Normarc. Normarc 7220A 20-Element Localizer Antenna System [M]. Normarc, 2012.

[5] Normarc. Normarc 7220B 20-Element Localizer Antenna System [M]. Normarc, 2012.

[6] Normarc. Normarc 7220C 20-Element Localizer Antenna System [M]. Normarc, 2012.

[7] Thales. ILS-LOC 411-Technical Manual [M]. Thales, 2000.

[8] Normarc. Normarc 7216A 16-Element Localizer Antenna System [M]. NORMARC, 2013.

- [9] Normarc. Normarc 7216C 16-Element Localizer Antenna System [M]. NORMARC, 2013.
- [10] Normarc. Normarc 7212A 16-Element Localizer Antenna System [M]. NORMARC, 2013.
- [11] Normarc. Normarc 7212C 16-Element Localizer Antenna System [M]. NORMARC, 2013.
- [12] 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.
- [13] 瞿淳清.基于航向天线的对数周期偶极子天线建模分析 [J]. 航空电子技术, 2018, vol 2, 7~12 页.
- [14] 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.
- [15] 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.