

M 改型下滑天线与原始天线辐射性能 差异性分析



瞿淳清^{1, 2, *}

¹ 华东空管局监控中心, 上海 200335

² 华东空管局数字化创新实验室, 上海 200335

摘要: 对于 M 改型下滑天线与 M 型下滑天线结构相近, 从信号原理和馈电原理入手, 先从理论上分析 M 改型天线的基本信号辐射特征, 与原始 M 型天线之间进行差异性分析。再从飞行校验的天线参数调整视角出发, 根据飞行校验程序及信号采样规则, 通过三元天线的结构馈电幅度相位, 以及空间信号合成原理建立三维电磁模型。由理论分析和建模计算得出: 入口高度, 下滑角, 对称性的变化特征, 比较两中下滑天线各自的优势所在, 在安装初期的设备选型中起到借鉴作用。

关键词: 下滑天线; 对称性; 下滑角

DOI: [10.57237/j.cst.2025.04.003](https://doi.org/10.57237/j.cst.2025.04.003)

The Analysis of the Difference in Radiation Performance of M-Modification Glide Path Antenna and M-Type One

Qu Chunqing^{1, 2, *}

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

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

Abstract: The M-modified glide path antenna has a similar structure to the M-typed one. Firstly, from the signal principle and feeding principle, the basic signal radiation characteristics of the M-modified glide path antenna would be theoretically analyzed, and then compared M-modified with the original M-typed one. Secondly, from the perspective of adjusting antenna parameters based on the flight checking procedure and sampling rules, the characteristics of changes in threshold crossing height (TCH), glide path angle, and symmetry are calculated by a three-dimensional electromagnetic model through the structure, as well as the feeding amplitude and phase of a ternary antenna, as well as the principle of spatial signal synthesis. The advantages of the two glide antennas are compared, which can serve as a reference for equipment selection during the initial installation stage.

Keywords: Glide Path Antenna; Symmetry; Glide Path Angle

*通信作者: 瞿淳清, qcq04@163.com

1 引言

仪表着陆系统[1-3]是民用机场广泛使用的飞行器着陆引导设备。可以实现精密进近和非精密进近，当下滑设备与测距仪设备配合使用时，可以为飞行器提供垂直方向上的指引，并能提供连续的距离信息，从而实现精密进近。目前市场上使用较多的下滑信标是 M 型下滑天线、零基准下滑天线和边带基准下滑天线[4-7]，其天线的极化方式都是水平极化，通过与天线阵前方的反射面镜像信号在空间上合成与水平面呈 3.00°下滑角。M 型下滑天线的抗干扰能力比零基准下滑天线和边带基准下滑天线都强，其主要原因是 M 型下滑天线两个工作频率，具有捕获效应。此外 M 型下滑天线对反射面的平整度要求也较低，其优势来源于使用了上、中、下三个天线，单个天线的反射面的异常影响，不会对三个信号的最终合成造成太大影响。相比之下，零基准下滑天线只有上、下两个天线组成，上天线辐射纯边带信号（Side and Bands Only, SBO），下天线辐射载波信号（Carrier and Sidebands, CSB），任意一个天线因反射面不平整引起反射异常后，都会造成调制度差信号（Difference in Depth of Modulation, ddm）的严重扭曲。边带基准下滑天线同样只有上、下两个天线组成，由于更靠近地面，对反射面要求更高。基于以上优点，M 型下滑天线使用最为广泛，但 M 型下滑天线的缺点是价格昂贵，由于是双频系统，设备参数和安装调试过程也较为复杂。现有一种对 M 型下滑天线进行改型的天线，同样由上、中、下三个天线组成，但是舍去了余隙频率，作为一种单频工作的天线，称之为 M 改型下滑天线。

对 M 改型下滑天线的信号特征进行分析，并与 M 型下滑天线进行各种参数的综合对比，构建出可视化模型，以充分了解两者的差异及各自价值与优势所在。

2 结果与分析

首先从 M 改型下滑天线（MG）和 M 型下滑天线的馈电信号入手，由信号分配关系出发介绍天线架构，进而分析飞行校验中重要数据入口高度，下滑角，宽度，对称性等调试过程中的差异性。设备信号及地形数据采用以下参数进行计算，工作频率为 $f=333.35$ MHz，对应波长为 $\lambda=0.9$ m；铁塔底座选择典型安装位置，至跑道中心线的内撤距离 $l=120$ m，至跑道端入口处的后撤距离 $d=300$ m。

2.1 天线介绍

M 改型下滑天线与原始天线最大的差异体现在天线信号分配关系上，由馈电网络结构的变化，实现对辐射场型进行调整，进而达到设计需求。

2.1.1 馈电原理变化情况

在馈电原理上，M 改型下滑系统对上、中、下三个天线只馈送 CSB 和 SBO 信号，如表 1 所示。三个天线的馈电物理高度仍为 3:2:1，其中 CSB 信号依然只馈送给中天线和下天线，但是馈送比例发生了变化，中下幅度比为 0.58:1，不再是 1:2 的关系，此外，中天线的相位相对于下天线延迟了 217°，也不再是反相 180°。SBO 信号馈送给上、中、下三个天线，其幅度关系仍 0.58:1:0.58，不再是 1:2:1，由于中天线的 SBO 与下天线的 CSB 幅度比值为 0.1168，与原始天线比例相同，这是因为三个天线高度比没有变化，宽度 $DS=0.72^\circ$ 所需的 ddm 比例关系没有发生改变。上天线和下天线 SBO 初相位比中天线的滞后 217°，不再是 180°。

为方便比较，表 2 列出了原始天线的天线阵馈电分配关系。可以发现，原始的 CL 信号在改型天线中已经取消了。改型以后，馈电信号少了，但是 CSB 和 SBO 的馈电方式更复杂了，在半波长 180°相位延迟上，又加入了 37°，使得合成 ddm 信号在符合规范设计要求的同时，馈电能耗因相位变化有所降低。

表 1 M 改型下滑天线阵馈电方式

Ant	H	CSB	SBO
A _u	3h	Null	0.0677∠217°+ φ_u
A _m	2h	0.58∠217°	0.1168∠0°
A _d	1h	1.00∠0°	0.0677∠217°

表 2 M 型下滑天线阵馈电方式

Ant	H	CSB	SBO	CL
A _u	3h	Null	0.0584∠180°+ φ_u	0.2∠ φ_u
A _m	2h	0.5∠180°	0.1168∠0°	Null
A _d	1h	1.0∠0°	0.0584∠180°	0.2∠0°

下文通过改变上天线初相位，实现对下滑角度的调整，表中蓝色 φ_u 即为调整相位对应的馈电相位变化。

2.1.2 天线辐射信号

根据天线馈电信号特征，可以得出对应 CSB、SBO、CL 在空间垂面上的信号辐射特征，如图 1 所示，左图

为原始天线信号分布特征, 右图为改型天线信号分布。当 CLR 信号取消后, 通过调整中天线的 CSB 的幅度和初相位, 使得信号覆盖发生变化, 达到了低角度覆盖的要求。其设计优势是减少馈电信号量, CL 信号的取消将直接降低设计成本; 而缺点是双频信号变化单频, 抗干扰能力减弱了。两者的 SBO 信号分布, 有少许变化, 主要表现在低角度, $1\sim 2^\circ$ 位置的 SBO 幅度明显提高, 目的是保证 ddm 的线性良好, 并且使设计宽度达到 0.72° 。但这种 SBO 低角度的信号幅度提升, 直接导致信号更容易射到地空物体的影响, 降低了抗干扰性能。

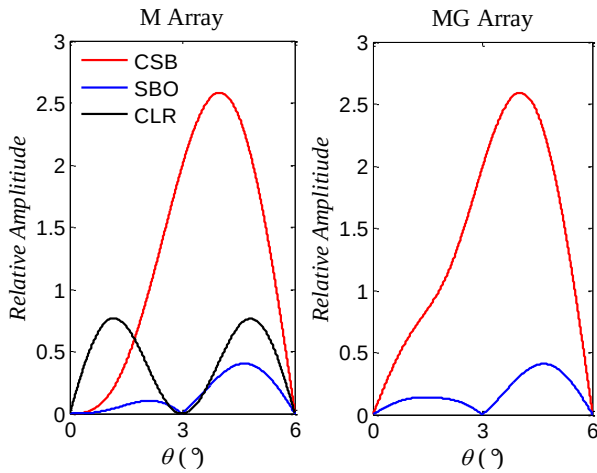


图1 两种天线辐射信号特征

2.2 入口高度值算法及调整策略

对天线的基本性能介绍后, 深一步比较两者在关键参数, 入口高度调试中的差异性表现。

2.2.1 入口高度算法

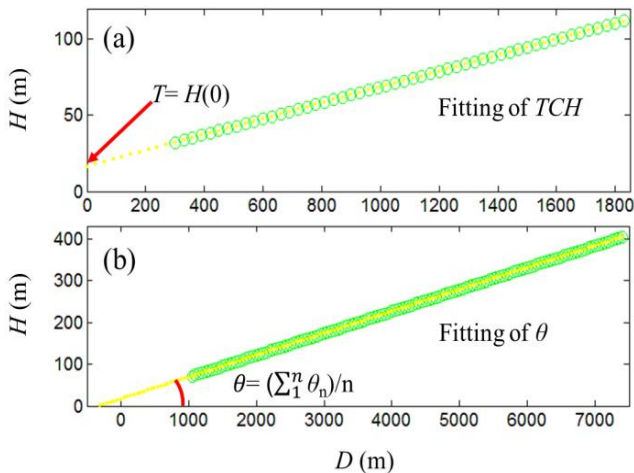


图2 入口高度和下滑角的算法

根据飞行校验方法[8-10], 进近过程中, 飞行员不断追踪下滑道的位置, 即 ddm 零点对应角度。图 2 分别给出了入口高度和下滑角的采样位置和算法, 上图为入口高度, 下图为下滑角。入口高度的采样区为距离跑道入口 1830 m 至 300 m 的 ddm 零点(图 2 上图的圆圈), 飞行轨迹在这段区域进行拟合[11](图中的圆点), 将拟合曲线推延到跑道入口正上方, 这个位置对应的高度即入口高度 T [12, 13]。

2.2.2 天线调整策略

通过对上天线在水平方向上进行机械偏移, 使得上天线 SBO 分布发生改变, 从而使三个天线的 SBO 合成信号发生变化, 而 CSB 信号维持不变, 这就能够有效改变近场 ddm 信号分布, 从而调整入口高度, 而远场信号几乎不会发生变化。这样, 改变上天水平方向的方法就成为了调整入口高度的有效工具。

图 3 对比了两种天线的调整差异, ϕ 为上天线偏转角度, 往跑道方向转动为正值。在左图中(使用标准的凯瑟琳天线辐射方向图[14]), 原始天线在 $\pm 10^\circ$ 范围内调整量可以达到 -2.7 米至 +1.9 米, 而改型天线范围是 -2.2 米至 +1.8 米调整效果明显减弱了。右图选用了另一种辐射方向图的天线模型[15], 结果可以看到, 两者的整体调整范围发生了变化, 但曲线的相对关系依旧。这充分说明了, 改型天线的调整效果比原始天线要差一些。

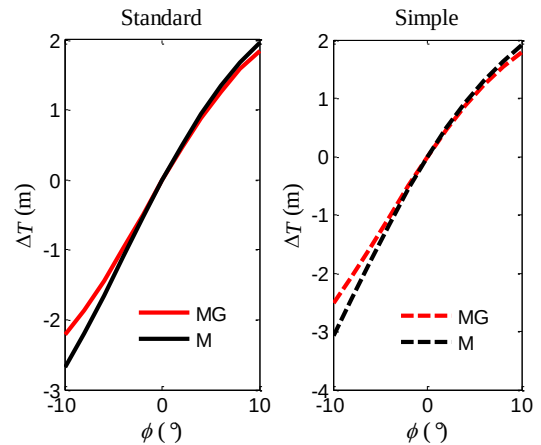


图3 入口高度改变量与上天线偏转关系

2.3 下滑角算法及调整策略

2.3.1 下滑角算法

在进近过程中, 飞行员不断追踪下滑道, 即捕获

ddm 的最小值，下滑角的采样区间为距离入口 7400 米至 1050 米，不同与入口高度的算法，下滑角的计算方式是在这段区域的每个捕获点返回一个仰角值，通过对这些仰角进行算数平均数计算即可得到下滑角，如图 2 下图所示。

2.3.2 调整下滑角——改变上天线初相位

在信号发生段，从上天线馈入一个相位，可以有效改变下滑角。图 4 给出当上天线相位加入至 50° 时，三个馈入信号 CSB、SBO、CL 辐射情况的比较，由于上天线不涉及 CSB 信号，所以对其无影响。原始天线的 CL 信号在下滑角位置不再是零，明显被抬高了，不过相比于 CSB 信号，两者强度差依然有十几 dB，故插入相位不影响系统的正常工作。原始天线的 SBO 信号在下滑角也不再是零，其直接结果是 ddm 不再有零点，但通过观察 CSB 曲线特征，从 0 到 4°，幅度不断增大，而 SBO 在 2 到 3° 幅度略微下降，可以判断 ddm 最小值依在 3° 不到的位置。对于改型天线，SBO 信号存在明显的谷值，位置在 3° 以下，可以确定下滑角明显减小了。

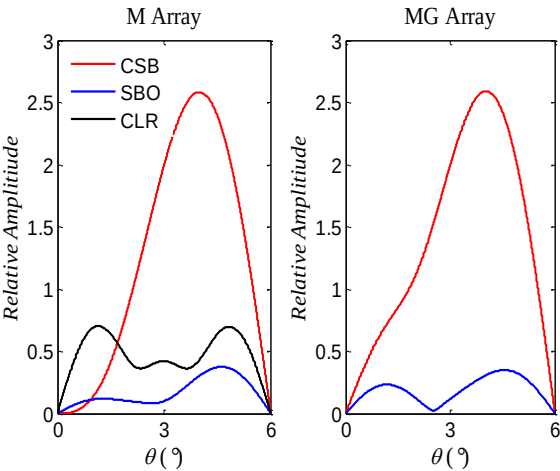


图 4 上天线加入 50° 相位后的信号分布图

为具体观察上天线初相位的变化对改型天线下滑

角的影响关系，图 5 列出了 ψ_0 从 -50° 到 50° 的远场 ddm 分布特征，图中 $ddm=0.0875$ ，即 8.75% 为半宽的限制，曲线与 0.0875 的交点即为上下半宽，下滑角以下的为正半宽，下滑角以上为负半宽，下半宽与上半宽角度的差值即为半宽。ddm 最小点为下滑角，由于下滑角具有远场特性，其数值与下滑角采样算法得到的结果非常接近。

当 ψ_0 为正值时，下滑角会减小，随着 ψ_0 的增大，下滑角不断变小。而当 ψ_0 为负值时，下滑角会变大，但只是增大一点点。

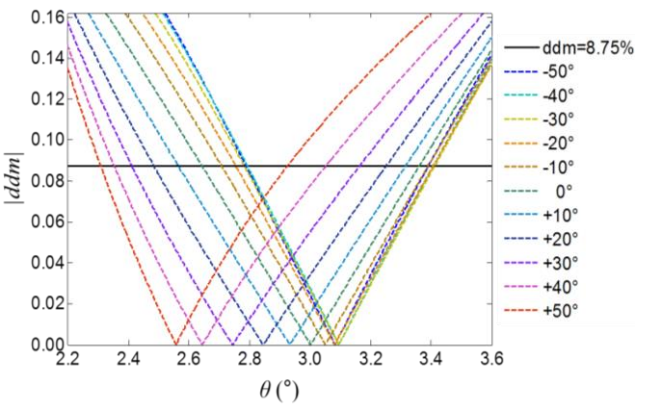


图 5 M 改型加相后 ddm 分布特征

2.3.3 参数分析

为了更精细的展示具体参数，表 3 详细列出了下滑角、上下半宽、以及对称性随上天线馈入相位的变化特征。上天线初始引入初始 ψ_0 在调整下滑角的同时，使得宽度 DS 产生了对应改变，同时对称性出现退化。当 $\psi_0 < 0$ 时，下滑角最大就增加了 0.08°，而当 $\psi_0 > 0$ 时，下滑角最大可以减小 0.55°。同时，对称性的变化也有类似的趋势，当 $\psi_0 < 0$ 时，对称性变化量只有 1.2%，而当 $\psi_0 > 0$ 时，对称性变化达到 9.7%。然而，DS 的变化趋势却不同，负方向为单调减小，而正反向则先增后减。

表 3 M 改型馈入相位后的下滑角及对称性参数

Phase	+0.0875	θ	-0.0875	DS	Symmetry
-50°	2.788°	3.083°	3.393°	0.605°	51.2%
-40°	2.793°	3.096°	3.408°	0.615°	50.7%
-30°	2.782°	3.096°	3.413°	0.631°	50.2%
-20°	2.754°	3.081°	3.408°	0.654°	50.0%
-10°	2.707°	3.050°	3.391°	0.684°	49.9%
0	2.642°	3.002°	3.362°	0.720°	50.0%
+10°	2.564°	2.933°	3.317°	0.753°	51.0%
+20°	2.486°	2.845°	3.253°	0.767°	53.2%
+30°	2.410°	2.744°	3.166°	0.756°	55.8%

Phase	+0.0875	θ	-0.0875	DS	Symmetry
+40°	2.352°	2.644°	3.054°	0.702°	58.4%
+50°	2.307°	2.557°	2.927°	0.620°	59.7%

图6对比了改型天线和原始天线在改变上天线相位调整下滑角的各项参数指标。图6(a)为M改型天线下滑角及上下半宽分布曲线，相位由小到大，整体为往下游的趋势，而图6(b)中M型呈对称分布，无论正负，只要馈入相位 ddm 整体下降，但改变效果不如改型天线，当 $\psi_u = 50^\circ$ 时下滑角约为 2.8° ，值降低了 0.2° ，而改型天线则为 2.557° ，降低越 0.55° 。图6(c)为宽度特性比较，改型在 $\psi_u = 20^\circ$ 时出现了最大值，然后往两边下降，而原始天线在 0° 有 DS 最小值，随相位的馈入而增大，到 40° 时出现反弹，正负对称分布。图6(d)为对称性特征，改型天线馈入相位后，正值会严重影响对称性，负值较为稳定，影响不大。原始天线为对称分布，馈入相位越大，对称性越差，正负呈对称分布。

原始天线的各项参数，均未对称分布，而改型天线则呈现为非对称分布。这是由于表1馈电信号中，引入了 217° 的初相位，使得原始对称性遭到破坏，从而在参数调试过程中，出现各种不对称现象。

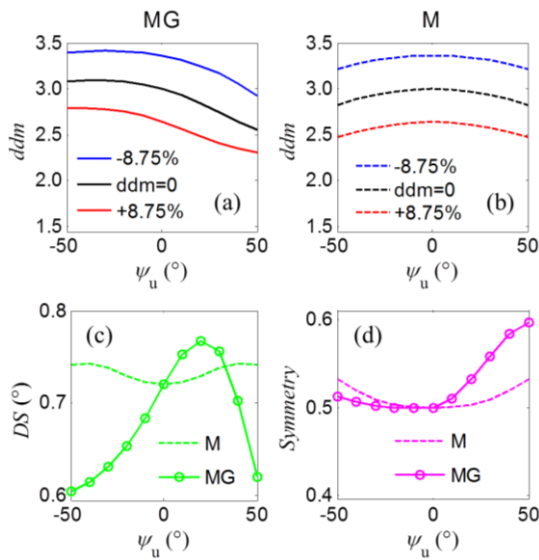


图6 下滑角，宽度与对称性指标分布

3 结语

通过对M改型下滑天线的介绍，对比与M型下滑天线的不同点，重要参数在发生信号和天线结构调整中的变化规律，系统性展示了两种天线各自的有缺点。在调整入口高度时，改型天线的调整趋势与原始天线一致，而效果略差。在下滑角调整过程中，两种差异

较大，原始天线多为对称性分布，而改型天线为非对称，某种情况下可以在调试过程中发挥出非对称性的优势。此为设备选型和系统调试提供充分参考依据。并为后续其它三元镜像结构下滑天线的性能指标给出了比较途径。

参考文献

- [1] Lu Y, Zheng Y, Wang Z, et al. Pilots' visual scanning behaviors during an instrument landing system approach [J]. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 2020, 91(6): 511-517.
- [2] Kwasiborska A, Grabowski M, Sedláčková AN, Novák A. The Influence of Visibility on the Opportunity to Perform Flight Operations with Various Categories of the Instrument Landing System. *Sensors (Basel)*. 2023 Sep 18; 23(18): 7953. <https://doi.org/10.3390/s23187953>
- [3] Sun J. Specification for Instrument Landing System [J]. *Exploration of Educational Management*, 2024, 2(5).
- [4] Normarc. Normarc 3543 Null Reference Glide Path Antenna System Instruction manual [G]. Oslo Norway, 2015.
- [5] Normarc. Normarc 3544 Sideband Reference Glide Path Antenna System Instruction manual [G]. Oslo Norway, 2015.
- [6] Normarc. Normarc 3545 M-Array Glide Path Antenna System Instruction manual [G]. Oslo Norway, 2016.
- [7] Chunqing Qu. Brief Introduction of a New Kind of Glide Path Antenna [J]. *Open Journal of Antennas and Propagation*, 2018, 6, 60-72.
- [8] 民用航空陆基导航设备飞行校验规范 [S]. 中国民用航空局, 2016.
- [9] 秦伟, 王芳. 仪表着陆系统飞行校验方法研究 [J]. *科技创新导报*, 2015, 12(14): 34.
- [10] 张蕴菁. 浅谈仪表着陆系统飞行校验及调试 [J]. *丝路视野*, 2017(24), Page 78-80.
- [11] 瞿淳清. 浅析水平扭转M型下滑天线对入口高度及下滑角的影响 [J]. *航空电子技术*, vol. I, 2014, Page 35-39.
- [12] Chunqing Qu, Digital Application on the Impact of Terrain on the Threshold Crossing Height Rising [J]. *World Journal of Engineering and Technology*, 2025, Vol 13, No 4, Page 845-854.

- [13] International Civil Aviation Organization, Annex 10, Aeronautical Telecommunications, vol. I, 3.1.5.3.1, [S], International Civil Aviation Organization (ICAO) 2006.
- [14] Normarc, Normarc7000B Training Manual [M]. Normarc, 2012, Page 23-24.
- [15] 瞿淳清. 基于数字孪生的天线结构优化设计 [J]. 科学与工程 2024.

作者简介

瞿淳清

1986 年生, 男, 上海, 高级工程师, 硕士研究生, , 从事空中交通管理工作, 负责通信导航监视设备管理。主要研究方向为: 无线电、计算机领域、天线辐射场型。

E-mail: qcq04@163.com