

引用格式:倪育德,王宁.下滑信标垂直覆盖性能分析[J].电光与控制,2020,27(2):70-74. NI Y D, WANG N. Analysis of vertical coverage performance of glide slope[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2):70-74.

## 下滑信标垂直覆盖性能分析

倪育德<sup>1,2</sup>, 王宁<sup>1,2</sup>

(1. 中国民航大学电子信息与自动化学院,天津 300300;  
2. 中国民用航空局民航航空器适航审定技术重点实验室,天津 300300)

**摘要:** 下滑信标(GS)利用镜像原理为精密进近过程中的飞机提供垂直引导信息,机场地形直接影响GS的垂直覆盖性能。首先研究4种类型GS的天线分配单元(ADU)、辐射场、调制度差(DDM)及角位移灵敏度,然后对比分析不同GS的波束弯曲能力(BBP),最后研究正坡(FSL)对下滑信标垂直覆盖性能的影响,提出相应的补偿方法。结合机场地形特点,可以为下滑信标类型选择、安装及调试提供理论依据。

**关键词:** 仪表着陆系统; 下滑信标; 辐射方向性图; 调制度差; 波束弯曲能力; 角位移灵敏度

**中图分类号:** V271.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.02.015

## Analysis of Vertical Coverage Performance of Glide Slope

NI Yude<sup>1,2</sup>, WANG Ning<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
2. Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness Technology, CAAC, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** The Glide Slope (GS) uses the mirror principle to provide vertical guidance information for the aircraft in precision approach process, and terrain of the airport directly affects the vertical coverage performance of the GS. In this paper, the Antenna Distribution Unit (ADU), radiation field, Difference of Depth of Modulation (DDM) and angular displacement sensitivity of four types of GS are studied at first, and then comparison and analysis is made to the Beam Bend Potential (BBP) of different GSs. Finally, the influence of Forward Slope (FSL) on the vertical coverage performance of the GS is studied, and the corresponding compensation method is proposed. Combined with the terrain characteristics glide slope of the airport, it can provide a theoretical basis for the GS selection, installation and debugging.

**Key words:** Instrument Landing System (ILS); glide slope; radiation pattern; difference of depth of modulation; beam bend potential; angular displacement sensitivity

### 0 引言

仪表着陆系统(ILS)为飞机在终端区提供精密进近服务,保证进近和着陆阶段的飞行安全。ILS包含航向信标(LOC)、下滑信标(GS)及指点信标(MB)3个子系统。GS工作频率为329.15~335.00 MHz,为进近飞机提供垂直引导信息<sup>[1]</sup>。下滑信标共有4种类型,分别为零基准下滑信标(NR)、边带基准B型下滑信标(SBR B)、边带基准G型下滑信标(SBR G)及M阵列下滑信标(M Array),以波束弯曲能力(BBP)衡量各类型GS抗干扰性能。

目前国内外关于4种类型GS垂直覆盖性能对比分析以及正坡(FSL)对GS覆盖性能影响的公开报道罕见。文献[2]使用半平面几何的地形建模应用于下滑信标调制度差(GS DDM);文献[3]建立应用于下滑信标DDM的基于几何衍射理论(GTD)地形反射模型;文献[4]提出了一种均匀衍射理论(UTD)计算GS DDM的方法;文献[5-6]基于多楔模型的射线追踪法分析NR DDM;文献[7]建立计算机仿真模型研究障碍物对GS DDM的多径干扰误差;文献[8]使用单楔模型理论计算障碍物对GS地面站辐射信号强度的影响;文献[9]研究了积雪厚度对NR DDM的影响。然而以上文献均未涉及不同类型GS对比分析以及FSL对下滑信标的影响。

### 1 下滑信标工作原理

下滑信标(GS)工作在UHF频段,天线辐射利用

收稿日期:2019-03-18

修回日期:2019-04-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2016YFB0502402)

作者简介:倪育德(1963—),男,江西鹰潭人,硕士,教授,研究方向为民用航空陆基无线电导航和星基无线电导航。

镜像原理<sup>[10-11]</sup>,如图1所示,其中, $h$ 为天线高度, $O$ 为相位中心, $r$ 为 $O$ 点到远场接收机的距离, $\theta$ 为俯仰角。

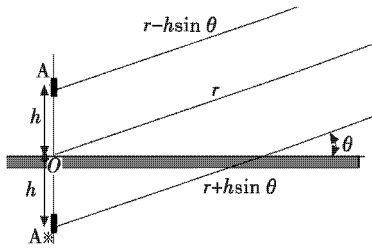


图1 GS天线传播的镜像原理

Fig.1 Mirroring principle of GS antenna propagation

下滑角 $\theta_0$ 取值范围为 $2^\circ \sim 4^\circ$ ,标称值为 $3^\circ$ 。“附件10”即文献[1]规定GS覆盖范围为上至地面以上 $1.75\theta_0$ 、下至地面以上 $0.45\theta_0$ ,为保证下滑道截获程序的需要,也

可下至地面以上 $0.30\theta_0$ 。在 $\pm 0.12\theta_0$ 处,DDM等于 $0.0875$ ,对I类设备性能的ILS下滑信标,其容差为 $0.07\theta_0 \sim 0.14\theta_0$ ;对于II类设备性能的ILS下滑信标,其容差在下滑道下方为 $0.10\theta_0 \sim 0.14\theta_0$ ,下滑道上方为 $0.07\theta_0 \sim 0.14\theta_0$ ;对于III类设备性能的ILS下滑信标,其容差为 $0.10\theta_0 \sim 0.14\theta_0$ ,上下扇区的角位移灵敏度( $S_n$ )应尽可能对称。

## 2 下滑信标垂直覆盖性能

首先分析4种类型GS的垂直覆盖及DDM,接下来对比4种GS的波束弯曲能力,然后在FSL不等于零的情况下,研究FSL对GS垂直覆盖性能的影响,最后提出FSL的补偿方法,算法流程如图2所示。

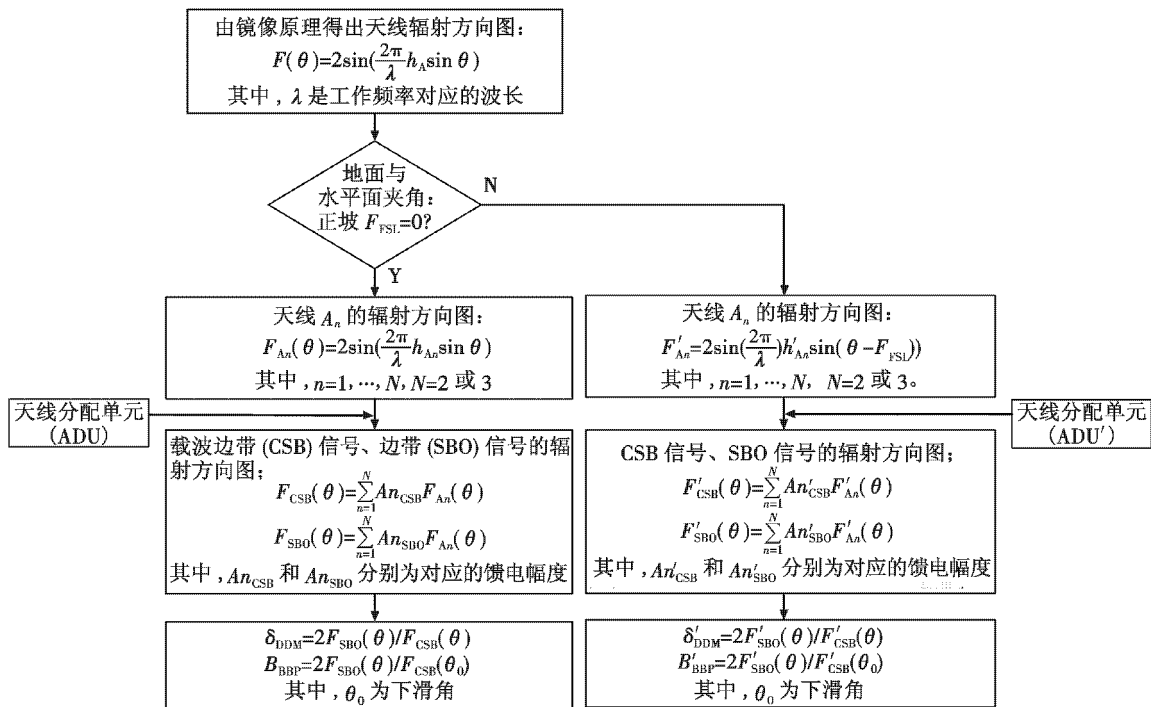


图2 算法流程图

Fig.2 Flow chart of the algorithm

### 2.1 NR垂直覆盖及DDM

NR天线系统由上、下天线组成,设定NR工作频率为 $329.15\text{ MHz}$ ,下滑角 $\theta_0 = 3^\circ$ ,所得NR垂直覆盖及DDM如图3所示。

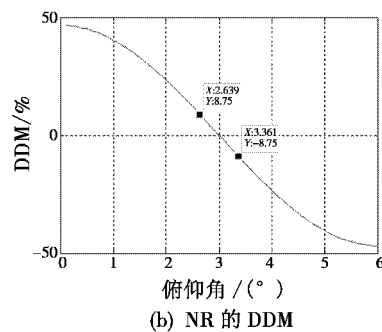
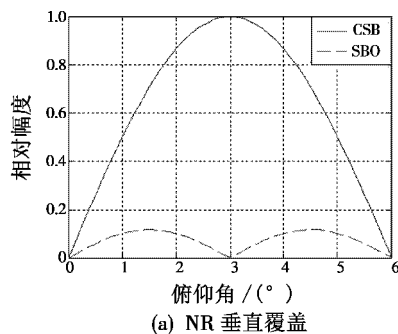


图3 NR垂直覆盖及DDM

Fig.3 Vertical coverage and DDM of NR

图3(a)为NR垂直覆盖,在俯仰角 $\theta = 3^\circ$ 处,载波边带信号(CSB)为最大值,边带信号(SBO)存在零陷,

覆盖范围低至 $0^\circ$ ,满足“附件10”的要求。图3(b)是NR的DDM,俯仰角 $\theta=3^\circ$ 时, $\delta_{\text{DDM}}=0$ ,所得下滑角为 $\theta_0=3^\circ$ ;  $\delta_{\text{DDM}}=0.0875$ 所对应的俯仰角为 $2.639^\circ$ , $\theta_0-0.12\theta_0=2.64^\circ$ ,从而可知位移灵敏度为 $2.639^\circ-2.64^\circ=-0.001^\circ=-0.00034\theta_0$ ;  $\delta_{\text{DDM}}=-0.0875$ 所对应的俯仰角为 $3.361^\circ$ , $\theta_0+0.12\theta_0=3.36^\circ$ ,从而可知,位移灵敏度为 $3.361^\circ-3.36^\circ=0.001^\circ=0.00034\theta_0$ ,且上下扇区角位移对称,符合“附件10”的要求。

## 2.2 SBR B 垂直覆盖及 DDM

SBR B 天线系统由上、下天线组成,设定 SBR B 工作频率为 329.15 MHz,下滑角  $\theta_0=3^\circ$ ,所得 SBR B 垂直覆盖及 DDM 如图 4 所示。

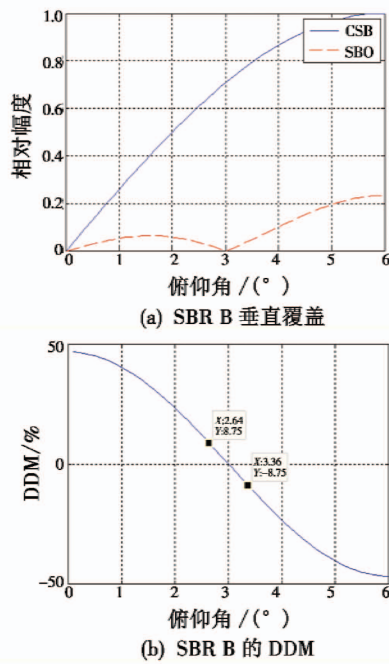


图4 SBR B 垂直覆盖及 DDM

Fig.4 Vertical coverage and DDM of SBR B

图4(a)为 SBR B 垂直覆盖,与图3(a)相比,CSB 信号的最大值在俯仰角  $\theta=6^\circ$  处;在俯仰角  $\theta=3^\circ$  处,SBO 信号存在零陷;下滑角以下的 SBO 信号幅度变小,可以减小低角度处障碍物的多径干扰,覆盖范围低至 $0^\circ$ ,满足“附件10”的要求。图4(b)是 SBR B 的 DDM,俯仰角  $\theta=3^\circ$  时, $\delta_{\text{DDM}}=0$ ,所得下滑角为  $\theta_0=3^\circ$ ;  $\delta_{\text{DDM}}=0.0875$  所对应的俯仰角为  $2.64^\circ$ , $\theta_0-0.12\theta_0=2.64^\circ$ , $2.64^\circ-2.64^\circ=0^\circ$ ;  $\delta_{\text{DDM}}=-0.0875$  所对应的俯仰角为  $3.36^\circ$ , $\theta_0+0.12\theta_0=3.36^\circ$ , $3.36^\circ-3.36^\circ=0^\circ$ ,与图3(b)相比,SBR B 的角位移灵敏度优于 NR,且上下扇区角位移对称,符合“附件10”要求。

## 2.3 SBR G 垂直覆盖及 DDM

SBR G 天线系统由上、下天线组成,设定 SBR G 工作频率为 329.15 MHz,下滑角  $\theta_0=3^\circ$ ,所得 SBR G 垂直覆盖及 DDM 如图 5 所示。

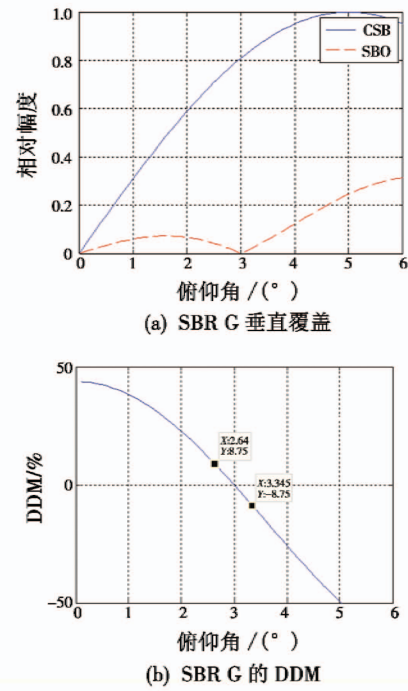


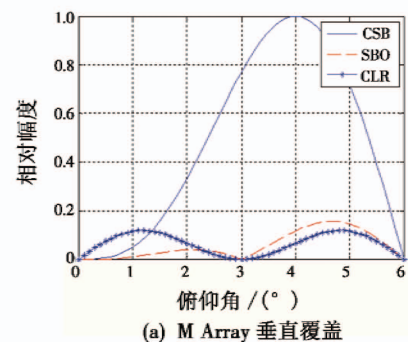
图5 SBR G 垂直覆盖及 DDM

Fig.5 Vertical coverage and DDM of SBR G

图5(a)为 SBR G 垂直覆盖,与图4(a)和图3(a)相比,CSB 信号的最大值在俯仰角  $\theta=5^\circ$  处;在俯仰角  $\theta=3^\circ$  处,SBO 信号存在零陷;下滑角以下的 SBO 信号幅度变得更小,可以进一步减小低角度处障碍物的多径干扰,覆盖范围低至 $0^\circ$ ,满足“附件10”的要求。图5(b)是 SBR G 的 DDM,俯仰角  $\theta=3^\circ$  时, $\delta_{\text{DDM}}=0$ ,所得下滑角为  $\theta_0=3^\circ$ ;  $\delta_{\text{DDM}}=0.0875$  所对应的俯仰角为  $2.64^\circ$ , $\theta_0-0.12\theta_0=2.64^\circ$ , $2.64^\circ-2.64^\circ=0^\circ$ ;  $\delta_{\text{DDM}}=-0.0875$  所对应的俯仰角为  $3.345^\circ$ , $\theta_0+0.12\theta_0=3.36^\circ$ , $3.36^\circ-3.345^\circ=0.015^\circ=0.005\theta_0>0.00034\theta_0$ ,与图4(b)和图3(b)相比,上半扇区 SBR G 的  $S_n$  优于 NR,但下半扇区 SBR G 的  $S_n$  次于 NR,且上下扇区角位移不对称,不过仍然符合“附件10”要求。

## 2.4 M Array 垂直覆盖及 DDM

M Array 天线系统由上、中、下天线组成,设定 M Array 工作频率为 329.15 MHz,下滑角  $\theta_0=3^\circ$ ,所得 M Array 垂直覆盖及 DDM 如图 6 所示。



(a) M Array 垂直覆盖



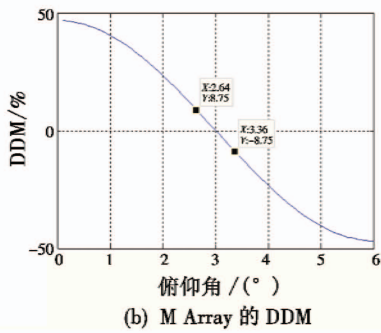


图6 M Array 垂直覆盖及 DDM

Fig.6 Vertical coverage and DDM of M Array

图6(a)为M Array垂直覆盖,分别与图3(a)、图4(a)、图5(a)相比,CSB信号的最大值在俯仰角 $\theta = 4^\circ$ 处;在俯仰角 $\theta = 3^\circ$ 处,SBO信号存在零陷; $3^\circ$ 以下的SBO信号幅度更小,可以更进一步减小低角度处障碍物的多径干扰,但低角度几乎无信号覆盖,所以额外辐射余隙信号、载波边带信号(CLR CSB),以满足低角度范围内的信号覆盖,覆盖范围低至 $0^\circ$ ,满足“附件10”的要求。图6(b)是M Array的DDM,俯仰角 $\theta = 3^\circ$ 时, $\delta_{DDM} = 0$ ,所得下滑角为 $\theta_0 = 3^\circ$ ;  $\delta_{DDM} = 0.0875$ 所对应的俯仰角为 $2.64^\circ$ ,  $\theta_0 - 0.12\theta_0 = 2.64^\circ$ ,  $2.64^\circ - 2.64^\circ = 0^\circ$ ;  $\delta_{DDM} = -0.0875$ 所对应的俯仰角为 $3.36^\circ$ ,  $\theta_0 + 0.12\theta_0 = 3.36^\circ$ ,  $3.36^\circ - 3.36^\circ = 0^\circ$ ,与图3(b)、图4(b)、图5(b)相比,M Array的Sn优于NR及SBR G,且上下扇区角位移对称,符合“附件10”的要求。

2.5 4种GS的波束弯曲能力

假设在反射物仰角处,SBO信号完全反射,则波束弯曲能力(BBP)是可以预期的下滑道弯曲幅度,4种下滑信标的波束弯曲能力如图7所示,4种下滑信标BBP按照大小排序,NR > SBR B > SBR G > M Array,抗干扰能力NR < SBR B < SBR G < M Array。

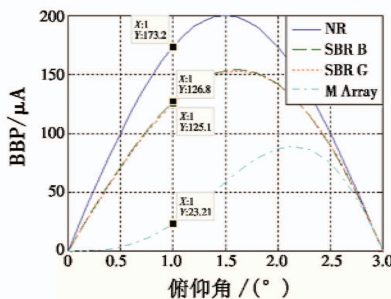


图7 4种GS的BBP

Fig.7 BBP of four kinds of GS

表1 4种下滑信标的BBP及Ac

Table 1 BBP and Ac of four kinds of GS  $\mu A$

	NR	SBR B	SBR G	M Array
BBP	173	127	125	23
Ac	$\pm 35$	$\pm 25.4$	$\pm 25$	$\pm 4$

在低仰角处用于演算下滑信标BBP的常用值为 $1/3\theta_0$ ,实际上反射物体仅仅反射入射信号的10% ~

20%,真实的弯曲幅度( $A_c$ )等于反射因子与BBP的乘积。假设反射因子为0.2,在 $1/3\theta_0 = 1/3 \times 3^\circ = 1^\circ$ 处,4种下滑信标的BBP及 $A_c$ 如表1所示。

结合图3、图7及表1可知,M阵列下滑信标角位移灵敏度性能最好,且上下扇区对称;BBP最小,抗干扰性能最好,综合来说,M阵列下滑信标的性能最优。然而终端区安装下滑信标选择GS类型时,还需考量周边地形条件。

2.6 FSL对GS垂直覆盖性能的影响及补偿方法

下滑信标正前方的反射平面与水平面的夹角定义为正坡(FSL),如图8所示。

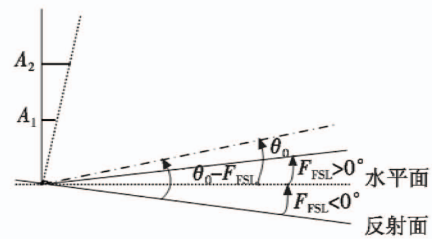


图8 FSL示意图

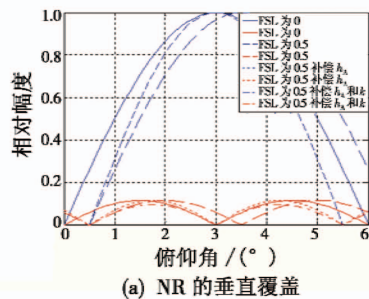
Fig.8 FSL schematic

如果FSL不为零,则天线高度及SBO信号相对于CSB信号幅度 $k$ 的补偿方法为

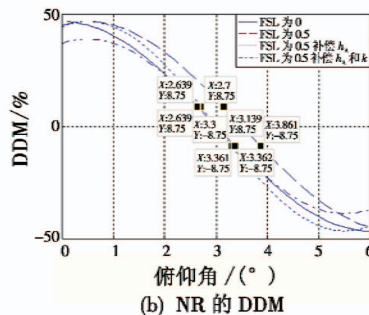
$$h'_{An} = \frac{\lambda}{n \cdot 4 \sin(\theta_0 - F_{FSL})} \quad (1)$$

$$k' = k \frac{(\theta_0 - F_{FSL})}{\theta_0} \quad (2)$$

以NR为例,分析FSL对下滑信标垂直覆盖性能的影响。设置NR工作频率为329.15 MHz,FSL为 $0.5^\circ$ ,所得零基准下滑信标的垂直覆盖及DDM如图9所示。



(a) NR的垂直覆盖



(b) NR的DDM

图9 FSL对NR垂直覆盖及DDM的影响

Fig.9 Effect of FSL on NR vertical coverage and DDM



图9(a)为NR垂直覆盖,直线表示FSL为零,在俯仰角 $3^\circ$ 处,CSB信号达到最大值,SBO信号出现零陷;虚线表示FSL为 $0.5^\circ$ ,CSB信号和SBO信号向上平移 $0.5^\circ$ ,CSB最大值及SBO零值点位于俯仰角 $3^\circ$ 方向;点线表示FSL为 $0.5^\circ$ 且补偿天线高度,可看出CSB最大值及SBO零值点回归到俯仰角 $3^\circ$ 方向;点划线表示FSL为 $0.5^\circ$ 且补偿天线高度及 $k$ ,可知,CSB最大值及SBO零值点回归到俯仰角 $3^\circ$ 方向,而且SBO信号峰值减小。图9(b)是对应于图9(a)的零基准下滑信标DDM,4种情况的对比如表2所示。

表2 NR DDM在FSL 4种情况下的对比

Table 2 Comparison of NR DDM in four cases of FSL

	下滑角	$\delta_{DDM} = 0.0875$	$\delta_{DDM} = -0.0875$	$S_n$	$S_n$ 对称性
FSL为 $0^\circ$	$3^\circ$	$2.639^\circ$	$3.361^\circ$	正常	对称
FSL为 $0.5^\circ$	$3.5^\circ$	$3.139^\circ$	$3.861^\circ$	不变	对称
FSL为 $0.5^\circ$ 补偿 $h_A$	$3^\circ$	$2.7^\circ$	$3.3^\circ$	稍大	对称
FSL为 $0.5^\circ$ 补偿 $h_A$ 和 $k$	$3^\circ$	$2.639^\circ$	$3.362^\circ$	基本不变	基本对称

根据图9及表2可知,FSL使得下滑角发生偏移,但并不影响 $S_n$ 的大小和对称性;仅修正天线高度可以消除FSL造成的下滑角偏移,但扇区宽度增大, $S_n$ 变大;同时对天线高度以及 $k$ 值进行调整,不但可以消除FSL造成的下滑角偏移,也使得 $S_n$ 的大小和对称性恢复正常,补偿了FSL对下滑天线垂直覆盖性能的影响。

### 3 结束语

本文首先分析4种不同类型GS的垂直覆盖性能,然后对比不同下滑信标的BBP,最后研究了FSL对下滑信标垂直覆盖性能的影响,并提出可行的调整方案加以补偿,可为机场终端区GS地面设备的选择、安装以及调试提供相应的理论支撑。

### 参 考 文 献

[1] ICAO. Aeronautical Telecommunications Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation (Volume I) [S]. 6th ed. Canada: International Civil Aviation Organi-

zation, 2016.

- [2] GODFREY J T, HARTLEY H F, MOUSSALLY G J. Terrain modeling using the half-plane geometry with application to ILS glide slope antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1976. doi:10.1109/TAP.1976.1141339.
- [3] LUBBERS R, UNGVICHIAN V, MITCHELL L. GTD terrain reflection model applied to ILS glide slope[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1982. doi:10.1109/TAES.1982.309201.
- [4] POULOSE M M, MAHAPATRA P R. ILS glide slope evaluation for imperfect terrain [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24(2):186-191.
- [5] POULOSE M M. An improvement computer model for ILS glide slope evaluation [C]//The 5th Brunei International Conference on Engineering and Technology (BICET 2014), IET Press, 2015:1-4.
- [6] 吴华新,赵修斌.应用多劈模型的仪表着陆系统地形评估方法[J].西安交通大学学报,2011,45(7):82-88.
- [7] CHO K, KWAK Y. Multipath interference error analysis on obstacles effect [C]//The 8th International Conference on Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition (SIP), IEEE Press, 2015:25-29.
- [8] ZHANG X H, FENG W Q, XIANG S L. Research on the influence of obstacles in the airport terminal area on ILS ground station [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.556-562.4672.
- [9] WALTON E K. Effect of wet snow on the null-reference ILS system[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(3):1030-1035.
- [10] Indra. Normarc 7000B ILS training manual 24036-042 [G]. Indra, 2012.
- [11] Thales. Instrument landing system glide path 422 [G]. Thales, 2010.