

应用多劈模型的仪表着陆系统地形评估方法

吴华新, 赵修斌

(空军工程大学电讯工程学院, 710077, 西安)

摘要: 针对机场起伏地形对仪表着陆系统性能的影响, 提出了一种应用地形多劈模型的系统下滑道仿真评估方法. 该方法应用一致性几何绕射理论建立仪表着陆系统下滑信标传播的基本模型, 采用一种扫描搜索算法对地形多劈模型进行射线寻迹并得到受非理想地形影响所形成的空间复合场, 所使用的扫描搜索算法能根据所考虑阶数射线的贡献来分析和评估起伏地形对仪表着陆系统影响的可接受程度. 应用该方法对实际环境中的仪表着陆系统下滑道进行评估, 结果表明该方法能准确、有效地预测起伏地形对仪表着陆系统下滑道造成的影响, 而在考虑更高阶数射线的影响时, 预测结果更为接近飞行检验结果.

关键词: 仪表着陆系统; 地形评估; 多劈模型; 电磁散射; 射线寻迹; 仿真评估

中图分类号: TN96; V351 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0082-07

Terrain Evaluation Method for Instrument Landing System via Multi-Wedge Model

WU Huaxin, ZHAO Xiubin

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Uneven terrain in an airport affects the performance of an instrument landing system (ILS), hence a simulated prediction method for evaluating ILS glide slope performance based on multi-wedge model of uneven terrain is proposed, where the uniform theory of diffraction (UTD) is adopted to establish a basic propagation model for ILS glide slope signal in space. A scanning-search algorithm is used to ray-trace the multi-wedge model for uneven terrain and to get the complex electromagnetic field in space, and the acceptability of the terrain effect can be evaluated according to the specified order of rays. Evaluation of the ILS glide slope in practical airport environment is performed with the proposed method, and the results show that accurate and effective predictions for ILS glide slope performance can be realized, and the prediction results are closer to flight inspection when the effect of higher order rays are considered.

Keywords: instrument landing system; terrain evaluation; multi-wedge model; electromagnetic scattering; ray tracing; simulation evaluation

仪表着陆系统以仪表指针方式为飞行员提供航向道、下滑道和距离信息, 引导飞机进场着陆, 目前在全世界已有上千个军用和民用机场装备了该系统. 仪表着陆系统下滑天线的垂直方向性是借助地面反射效应形成的, 为了得到理想的辐射场型, 需要

天线前方是大面积的平坦地面^[1]. 然而, 由于实际机场地形不理想, 起伏的地形会引起仪表着陆系统下滑信号畸变, 使得下滑指针无法正确指示飞机偏离下滑道的角度, 从而导致飞机在颠簸状态下着陆, 极端情况下可能会使飞机冲撞跑道, 造成严重后果^[2].

收稿日期: 2010-11-25. 作者简介: 吴华新(1982—), 男, 博士生; 赵修斌(联系人), 男, 教授. 基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(SJ08F06); 空军工程大学研究生科技创新专项计划资助项目(Dx2010303).

网络出版时间: 2011-04-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110422.1045.002.html>

因此,需要在机场设计和规划阶段评估当前给定地形条件下仪表着陆系统的下滑道质量。

进行系统场地环境评估的传统方法是对临时安装的地面设备进行飞行测量,并通过分析测量结果来评估当前配置情况下的系统性能,通常这种试验方法耗费巨大。此外,一次飞行测量只能得到当前地形和设备条件下的下滑道数据,而不能对改动配置后的系统作出评估,若要达到理想效果,则需要进行多次反复测量^[3]。为了实现更为经济和快速的系统场地环境评估,人们纷纷寻求其他快速有效的解决办法。例如,Geise 等^[4-5]提出了一种使用缩比模型来分析机场移动飞机对仪表着陆系统影响的方法,将系统的工作波长和相应的距离参量成比例缩小,通过对缩比模型测量数据的分析来研究场地环境对系统造成的影响,但是此方法需要建立信号发射端、机载接收端以及对应实际环境的缩比模型,并进行测量分析,同时还需要考虑缩比因子选取、缩比关系的有效性验证等问题。随着电波散射数值算法的发展和计算机性能的不断提高,人们逐渐采用仿真预测的手段对场地环境中的电磁散射体进行建模,并对电磁波的传播进行仿真,以实现对场地环境的预测和评估。应用仿真预测的方法对系统设备的安装进行指导,可以大大缩短设备安装和校飞所耗费的时间^[6-7]。

为了实现对仪表着陆系统下滑道进行快速、准确的评估,本文从仪表着陆系统下滑信息场形成的原理出发,首先分析起伏地形对仪表着陆系统的影响,然后给出基于地形多劈模型的下滑道仿真评估方法,最后应用该方法对实际机场地形场景进行仿真分析和验证。

1 起伏地形对仪表着陆系统的影响

仪表着陆系统由下滑信标建立下滑信息场,下滑信标以提供下滑面(与跑道平面成一定角度的平面)的形式为飞机提供仰角指示信息,并通过下滑天线阵向空间辐射 2 种信号:一种是导航音频“和”信号 $A_{90} \sin \omega_{90} t + A_{150} \sin \omega_{150} t$ 对载频 ω_c 调幅得到的载波加边带(CSB)信号

$$A_m (1 + m \sin \omega_{90} t + m \sin \omega_{150} t) \cos \omega_c t \quad (1)$$

另一种是导航音频“差”信号 $A'_{90} \sin \omega_{90} t - A'_{150} \sin \omega_{150} t$ 对载频平衡调幅得到的纯边带(SBO)信号

$$A'_m (m \sin \omega_{90} t - m \sin \omega_{150} t) \cos \omega_c t \quad (2)$$

仪表着陆系统下滑天线需要依靠地面的反射来形成辐射场型,并利用其垂直方向性形成下滑信号。

CSB 信号由下滑天线阵形成的最大值指向下滑角方向的宽波束辐射,SBO 信号由下滑天线阵形成的以下滑角方向为对称中心的双波束辐射,两波束有 180° 的相位差,如图 1 所示。上述信号在空间叠加后形成一个空间合成复合调幅信号场,在此空间复合信号场中,任意一点的调制度差(DDM)都不相同。以设定的下滑线为基准线,在垂直平面上形成调制度差方向性图:在下滑线上,调制度差为 0;在下滑线以上,90 Hz 调制度占优势;在下滑线以下,150 Hz 调制度占优势。机载接收设备接收处理这个信号场内的复合调幅信号,通过计算解调后 90 Hz 和 150 Hz 调制音频信号的调制度差值,来测量飞机偏离下滑道的角度和方向,从而确定飞机偏离下滑面的程度。

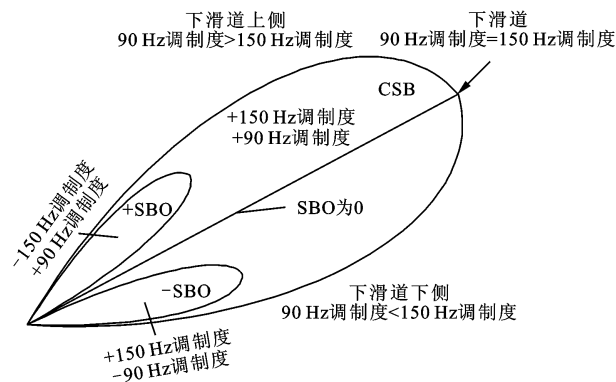


图 1 下滑信标辐射方向图的相位特性侧视图

在进行仪表着陆系统天线设计时,通常认为机场地面是理想光滑的,但是实际上机场地形是存在一定起伏的,这样的地形会引起电波传播的相位差,造成辐射场型的形变。此外,由于起伏地形的存在,下滑天线所发射的下滑信号会经由地形的散射,通过多个路径传播到达机载接收机,因此在机载接收机处将对接收信号形成多径散射场,造成机场环境多径效应,从而影响机载导航设备对空间位置的判读,严重影响系统的着陆安全。因此,需要建立起伏地形模型并采用合适的方法来分析下滑信标在空中的传播和接收过程,以有效地预测和评估机场非理想地形对系统的影响及其可接受的程度,从而实现更高效的机场规划和建设。

2 基于地形多劈模型的下滑道仿真评估方法

2.1 起伏地形的多劈模型

对于仪表着陆系统下滑道而言,若下滑角设定为 3° ,则其第一菲涅尔区长度为 $300 \sim 700$ m,其宽

度仅有不到 35 m. 由于起决定性作用的只是第一菲涅尔区, 这意味着下滑天线到着陆飞机连线左、右各 20 m 的区域决定了起伏地形对下滑道的影响程度^[8]. 设沿跑道中线飞机着陆反方向为 X 轴, 垂直跑道平面方向为 Y 轴, 建立右手坐标系. 由于飞机处于下滑天线的远场区, 对于机场跑道 Z 方向变化缓慢的地形, 可以通过以下步骤来建立其多劈模型:

(1) 根据机场的地形图, 得到平行于跑道中线且过下滑天线的地形轮廓;

(2) 依据瑞利准则^[9], 使用线段对地形轮廓进行近似, 所取线段数取决于地形起伏的程度;

(3) 对使用线段近似后的地形轮廓线进行横向扩展, 便可产生多劈模型.

得到的多劈模型如图 2 所示, 该模型假定起伏的地形由连续的平坦板块构成, 紧邻的两个板块构成一个直边劈.

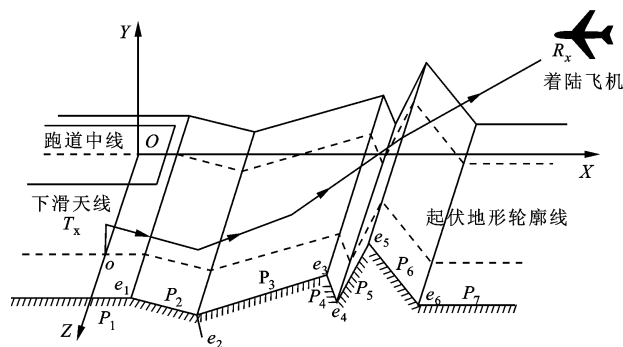


图2 起伏地形的多劈模型

2.2 下滑信标传播的一致性几何绕射理论模型

一致性几何绕射理论(UTD)作为一种高频解析方法, 一直是分析计算电大尺寸物体辐射特性的较好方法^[10]. UTD 完全采用射线方法描述高频电磁波的传播轨迹. 对于仪表着陆系统信道, 系统所发射的下滑信号将会在地面发生反射、绕射, 从而形成由反射场、绕射场构成的散射场. 假设发射的信号在多劈地形的某一点 Q 发生反射或绕射, 则由 Q 点处的入射场 $E_i(Q)$ 在空间 S 点处产生的散射场 $E_s(Q)$ 可以表示为

$$E_s(Q) = \begin{cases} \overline{\mathbf{R}} E_i(Q) A_r(s) e^{-jks}, & Q \text{ 点为反射点} \\ \overline{\mathbf{D}} E_i(Q) A_d(s) e^{-jks}, & Q \text{ 点为绕射点} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\overline{\mathbf{R}}$ 为并矢反射系数; $\overline{\mathbf{D}}$ 为并矢绕射系数; $A_r(s)$ 、 $A_d(s)$ 分别是反射和绕射的路径扩散因子^[11]; s 为 Q 到 S 的距离; $k=2\pi/\lambda$ 为波常数, 其中 λ 为下滑信标的工作波长.

2.3 空间复合场的计算

由于起伏地形的影响, 下滑天线所发射的信号可以经由很多条传输路径到达机载接收机. 如图 2 所示, 传输路径上可能既有平面的反射射线, 又有劈的绕射射线, 根据 UTD 理论, 除了直达射线外, 每一条射线都由下滑天线发射的信号经由地面反射和绕射后到达接收机. 令 E_{los} 为视距路径的场贡献, E_r 是经多劈地形反射、绕射所造成的场贡献, 则接收信号场可以表示为

$$E_{\text{total}} = E_{\text{los}} + E_r \quad (4)$$

设有 $M_{m,n}$ 条射线经历 m 次反射、 n 次绕射后到达接收机, 令 $\mathbf{R}$ 表示经平面反射到达下一个散射点的复合反射系数集合, $\mathbf{D}$ 表示经棱边绕射到达下一个散射点的复合绕射系数集合, 则有 $\mathbf{R} = \{\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \dots, \mathbf{R}_m\}$, 其中 $\mathbf{R}_i = \overline{\mathbf{R}}_i A_r(s_{ri}) e^{-jks_{ri}}$, $i = 1, 2, \dots, m$; $\mathbf{D} = \{\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \mathbf{D}_3, \dots, \mathbf{D}_n\}$, 其中 $\mathbf{D}_j = \overline{\mathbf{D}}_j A_d(s_{dj}) e^{-jks_{dj}}$, $j = 1, 2, \dots, n$. 令 $\mathbf{P} = \{\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_m, \mathbf{P}_{m+1}, \dots, \mathbf{P}_{m+n}\}$, 其中 $\mathbf{P}_i = \mathbf{R}_i$, $\mathbf{P}_{m+j} = \mathbf{D}_j$, 则有

$$E_r = \sum_{m+n=1}^L \sum_{l=1}^{M_{m,n}} E(Q_l) \prod_{k=1}^{m+n} P_{x_{l,k,m,n}} \quad (5)$$

式中: $E(Q_l)$ 表示每条路径上第一个反射点或绕射点处的入射场; $P_{x_{l,k,m,n}}$ 表示发生 m 次反射、 n 次绕射射线组中第 l 条射线的第 k 次绕射的复合绕射系数, 根据 $x_{l,k,m,n}$ 的不同在集合 $\mathbf{P}$ 内选取; $m+n$ 表示所考虑射线的阶次; L 表示全部所考虑射线的最高阶次.

可见, 接收信号场的求解只需按照所需考虑的射线的最高阶次, 根据经历的反射和绕射阶次依次分组寻找到可以到达接收点的路径, 并得到每条路径上的 $E(Q_l)$ 及其对应的集合 $\mathbf{P}$ 即可.

对于地形的多劈模型而言, Z 轴方向的路径分量并不会影响到射线的传播路径在 X - Y 平面投影的位置, 故可以先将整个场景投影到 X - Y 平面, 并通过采用一种射线扫描算法来找出所有到达接收机的非受阻路径, 确定反射点和绕射点在 X - Y 平面的投影之后再转换到原坐标系中, 根据镜像原理和费马理论确认反射点和绕射点的 Z 坐标, 从而得到 $E(Q_l)$ 和 $\mathbf{P}$, 以实现仪表着陆系统在多劈模型中的射线寻迹和计算. 当机载接收机处于空中某个固定位置时运行算法, 当飞机位置改变时, 需要更新接收点位置并用同样的算法进行计算, 直至飞机运动轨迹上所有考虑的位置计算完毕. 具体算法流程如图 3 所示, 步骤描述如下.

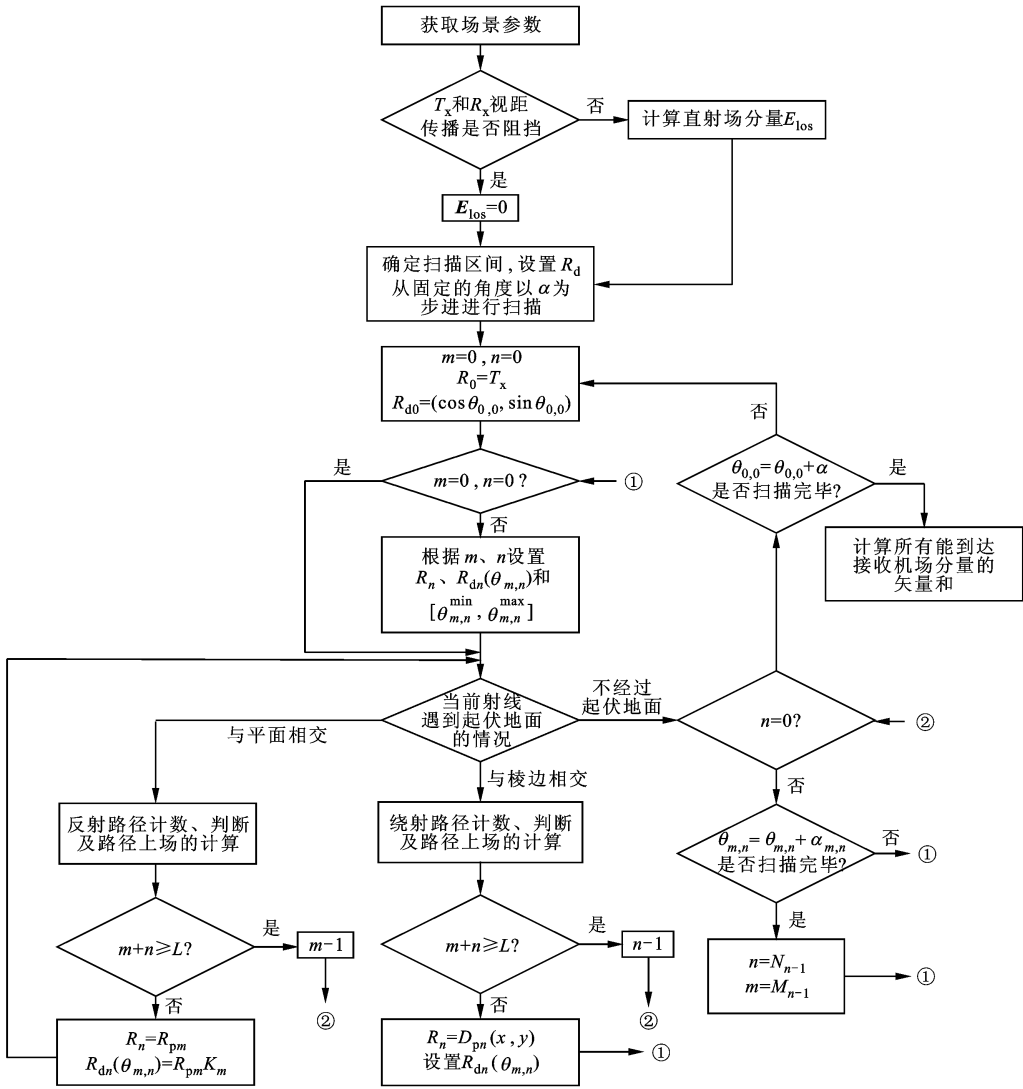


图 3 多劈模型的射线寻迹算法流程

- (1)首先获取场景参数,包括下滑天线位置 T_x 、接收机位置 R_x 及地形进行多劈建模后的参数,并根据需要设置所考虑射线的最高阶次 L .
- (2)根据 T_x 和 R_x 测试视距路径是否被起伏地形阻隔,若阻隔则将直射场分量 E_{los} 置 0,否则根据 T_x 和 R_x 的三维坐标计算得到视距路径分量,并在计算完成后继续下面的流程.
- (3)根据实际场景进行扫描初始化,确定 T_x 的角度扫描区间,设置扫描步进 α .
- (4)初始化路径反射和绕射阶数计数器: $m=0$, $n=0$,扫描原点 R_0 为 T_x ,扫描变量 $R_d(\theta_{0,0})=(\cos\theta_{0,0}, \sin\theta_{0,0})$.
- (5)若 $n=0$,则进入步骤(6),否则根据路径的 m,n 设置扫描原点 R_n 和扫描变量 $R_{dn}(\theta_{m,n})$, $\theta_{m,n} \in [\theta_{m,n}^{\min}, \theta_{m,n}^{\max}]$.

- (6)判断当前扫描射线与起伏地面的交汇情况,分为射线与起伏地面的平面交汇、射线与起伏地面的棱边交汇、未遇到起伏地面 3 种情况:①与平面交汇时,记录入射路径的源点 S_{pm} 和反射平面,进入步骤(7);②与棱边交汇时,记录入射路径的源点 S_{dn} 和绕射点 D_{pn} ,跳至步骤(8);③没有交汇点时,跳至步骤(9).
- (7)反射路径计数器计数 m 增 1,根据入射路径的源点 S_{pm} 和反射平面,计算得到相对于反射平面的镜像点 S'_{pm} 、反射点 R_{pm} 、射线经平面反射后的射线 $R_{\text{pm}}K_m$,并判断反射射线 $R_{\text{pm}}K_m$ 是否能到达 R_x ,若能够到达,则根据所记录的路径,转换到原坐标系中计算此路径在 R_x 的场贡献,之后判断 $m+n$ 与 L 的大小,若 $m+n \geq L$,则令 $m=m-1$,跳至步骤(9),否则将当前射线方向置为反射射线 $R_{\text{pm}}K_m$ 的方向,

射线端点置为 R_{pn} 点, 返回步骤(6)。

(8) 绕射路径计数器计数 n 增 1, 测试 D_{pn} 到 R_x 的通路是否阻隔, 若未阻隔则根据所记录的路径转换到原坐标系中计算此路径在 R_x 的场贡献, 之后判断 $m+n$ 与 L 的大小, 若 $m+n \geq L$, 则令 $n=n-1$, 进入步骤(9), 否则根据当前路径的 m, n 值设置扫描变量 $R_d(\theta_{m,n})$ 、步进 $\alpha_{m,n}$, 并计算当前绕射点的角度扫描边界 $\theta_{m,n}^{\min}, \theta_{m,n}^{\max}$, 令 $N_n=n, M_n=m$, 射线源端点置为 D_{pn} , 返回步骤(5)。

(9) 当 $n=0$ 时, 进入步骤(10), 否则, 令 $\theta_{m,n} = \theta_{m,n} + \alpha_{m,n}$ 并判断新 $\theta_{m,n}$ 是否超出扫描边界, 若未超出扫描范围则返回步骤(5), 若超出扫描范围, 则令 $n=N_{n-1}, m=M_{n-1}$, 再返回步骤(5)。

(10) 令 $\theta_{0,0} = \theta_{0,0} + \alpha$, 并判断新 $\theta_{0,0}$ 是否超出扫描范围, 若未超出扫描范围则返回步骤(4), 当超出给定范围时扫描结束, 计算所有到达接收点路径上场的矢量和, 算法结束。

对于图 2 中天线发射的电波经机场地形反射-反射-绕射到达着陆飞机的路径, 图 4 给出了在投影面上根据算法寻找到达接收点路径的过程。 T_x 与 R_x 坐标为已知, 当 $L \geq 3$ 、下滑天线 T_x 发射的射线在扫描到一定角度 $\theta_{0,0}$ 时, 即可根据算法寻找到在 $X-Y$ 面内到达 R_x 的有效路径

$$T_x(x_1, y_1, z_1) - R_{p1}(x_2, y_2, z_2) -$$

$$R_{p2}(x_3, y_3, z_3) - D_{p1}(x_4, y_4, z_4) - R_x(x_5, y_5, z_5)$$

同时亦可获取 R_{p1}, R_{p2}, D_{p1} 在 $X-Y$ 面内的投影坐标 $(x_i, y_i) (i=2, 3, 4)$ 。根据 T_x 的位置, 可以获取原坐标系中 T_x 相对于 P_2 平面的镜像点 $T_{P_2}(x'_1, y'_1, z'_1)$ 及 T_{P_2} 在 P_3 平面的镜像点 $T_{P_2P_3}(x''_1, y''_1, z''_1)$, 根据费马理论和镜像理论, R_{p1}, R_{p2}, D_{p1} 只需满足非线性规划

$$\min \sum_{i=1}^4 ((x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2)^{1/2}$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^3 ((x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 +$$

$$(z_{i+1} - z_i)^2)^{1/2} = ((x_4 - x''_1)^2 + (y_4 - y''_1)^2 +$$

$$(z_4 - z''_1)^2)^{1/2};$$

$$\sum_{i=1}^2 ((x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 +$$

$$(z_{i+1} - z_i)^2)^{1/2} =$$

$$((x_3 - x'_1)^2 + (y_3 - y'_1)^2 + (z_3 - z'_1)^2)^{1/2}$$

$$z_5 \leq z_4 \leq z_1 \quad (6)$$

根据已知条件和由算法获取的投影坐标求解式的可行域, 即可确定 R_{p1}, R_{p2}, D_{p1} 在原坐标系中的位

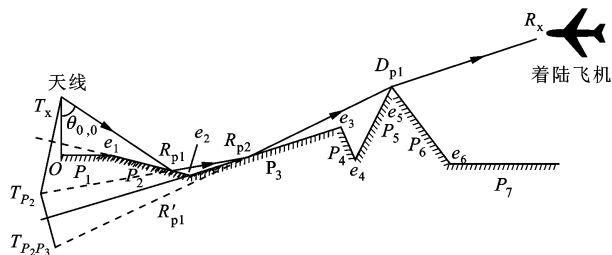


图 4 下滑信标经反射-反射-绕射到达着陆飞机的路径

置, 从而得到 $E(Q_1)$ 及相应的 $P = \{R_1, R_2, D_1\}$ 。对于该路径有

$$E(Q_1) = E(R_{p1})$$

$$E_l = E(Q_1) \overline{R_1} A_r(s_{r1}) e^{-jks_{r1}} \overline{R_2} A_r(s_{r2}) e^{-jks_{r2}} \cdot$$

$$\overline{D_1} A_D(s_{d1}) e^{-jks_{d1}} \quad (7)$$

根据所得 R_{p1}, R_{p2}, D_{p1} 的坐标可分别得到 $s_{ri}, s_{di}, A_r(s_{ri}), A_D(s_{di}), \overline{R_i}$ 和 $\overline{D_i}$, 代入式(7)即可得到该路径的贡献。

2.4 导航参量获取

机载接收机根据接收点的空间信号场获取飞机在空中的位置信息。在机载接收机处总的复合场是 CSB 和 SBO 信号场的和, 它们的包络分别为

$$E_{CSB} = A_{CSB} (1 + m \sin \omega_{90} t + m \sin \omega_{150} t) \quad (8)$$

$$E_{SBO} = A_{SBO} (m \sin \omega_{90} t - m \sin \omega_{150} t) \quad (9)$$

机载接收机的检波输出信号与接收点处总场包络的幅度成正比, 归一化的检波器输出可以表示为

$$E_{DO} = |(E_{CSB} + E_{SBO}) / A_{CSB}| \quad (10)$$

检波输出信号将通过 90 Hz 和 150 Hz 的滤波器, 可以得到滤波输出

$$E_{90} = m[1 + \text{Re}(A_{SBO}/A_{CSB})] \quad (11)$$

$$E_{150} = m[1 - \text{Re}(A_{SBO}/A_{CSB})] \quad (12)$$

由此可得关键参数调制度差为

$$D_{DM} = E_{90} - E_{150} = 2m \text{Re}(A_{SBO}/A_{CSB}) \quad (13)$$

由 SBO 和 CSB 产生的场贡献 A_{SBO} 和 A_{CSB} 的值可以由 2.3 节中的方法计算得到。

根据国际民航组织 (ICAO) 的仪表着陆系统下滑道标准^[12], 航道偏移指标 I_{CD} 变化 75 μA 相当于仰角变化 0.35°, 即有

$$I_{CD} = 150 \text{Re}(A_{SBO}/A_{CSB}) /$$

$$[|\text{Re}(A_{SBO}/A_{CSB})|_{-0.35^\circ} +$$

$$|\text{Re}(A_{SBO}/A_{CSB})|_{0.35^\circ}] \quad (14)$$

式中: $|\text{Re}(A_{SBO}/A_{CSB})|_{\pm 0.35^\circ}$ 表示 $\text{Re}(A_{SBO}/A_{CSB})$ 在 $\Delta\theta = \pm 0.35^\circ$ 处的值。

3 仪表着陆系统地形评估方法的验证与应用

为了评估起伏地形对仪表着陆系统下滑道的影响程度,对某实际机场的地形场景进行仿真分析. 机场的地形轮廓及场景参数如图 5 所示,机场的起伏地形属壤质潮湿型,下滑天线采用零基准天线,距离跑道着陆端口 305 m,距离跑道中线的横向位移为 135 m,上天线架高为 8.53 m(辐射 SBO 信号),下天线架高为 4.24 m(辐射 CSB 信号),工作频率为 335 MHz. 飞行路径设置为在 305 m 的高度沿跑道中线等高飞行,并假设其离天线足够远,使得下滑天线到飞机的连线几乎与跑道中线平行,实际下滑角为 3°.

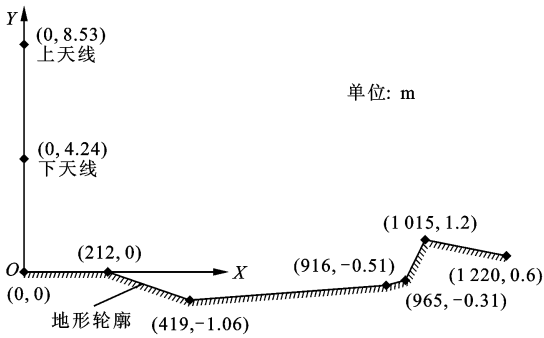


图 5 机场地形轮廓及下滑天线参数

根据基于多劈模型的地形评估方法建立模型,并分别对上、下天线辐射的信号场进行仿真,取 $L=2$,得到的预测结果如图 6 所示.

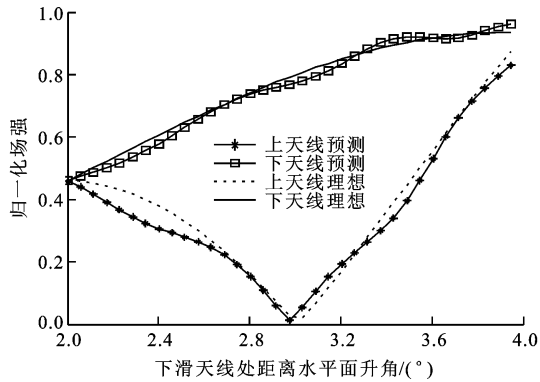


图 6 机载接收机所接收的归一化场强

由于机载接收机只能接收上、下天线的复合场,为了对比,图中同时给出了当机场为理想地形(地形轮廓线为图 5 中 $Y=0$ 的轮廓线)时的结果. 由于地形的起伏,预测所得到的机载接收机上、下天线场型

与理想地面的情况有所偏离,尤其是在与水平面 2.3°升角附近,上天线场型受到比较明显的影响,这是由于 X 轴方向距离下滑天线 212~965 m 处的地形凹陷所造成的.

图 7 给出了飞行路径上航道偏移指标 I_{CD} 随下滑天线与接收点水平升角的变化情况,当仅考虑一阶射线时,预测结果与飞行检验结果在 2.10°~2.35°处相差较大,这是由于所考虑的射线阶数未能准确表达实际的电波传播过程、二次反射分量的贡献被忽略所造成的. 当射线阶数考虑到二阶时,预测结果与飞行检验结果保持了较好的一致性,计算所得的系统下滑角为 2.98°,而飞行检验所得下滑角为 3.0°,飞行路径上的 I_{CD} 除了在 2.7°左右有所差别外,吻合程度很好,验证了本文预测评估方法的正确性. 当射线阶数考虑到三阶时,预测结果变动不大,这是由于高阶射线到达接收机的路径减少的缘故. 但是,由于考虑了高阶射线,在 2.7°附近预测结果更接近于飞行检验结果.

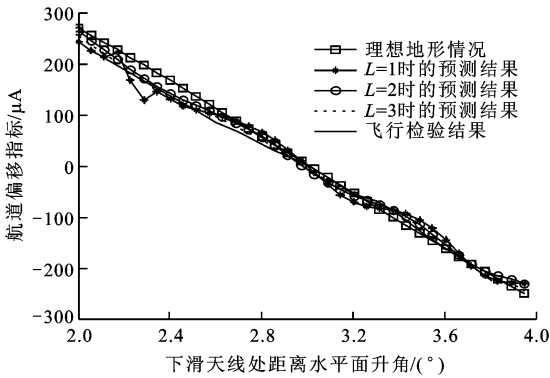


图 7 飞行路径上航道偏移指标的变化情况

预测结果及飞行检验结果与理想地形情况下的结果相比,在与水平面 2.3°升角附近有较大差别,可见 X 轴方向距离下滑天线 212~965 m 处的凹陷地形造成了下滑道上方场型的明显变化,但是这种变化对飞机下滑角的影响并不显著,当射线阶数考虑到三阶时,预测所得飞机的下滑角仍保持在 2.98°,所以既定机场的起伏地形并不会影响飞机的正常着陆.

4 结 论

机场起伏地形会造成下滑道结构的变化,影响飞机仪表着陆系统的性能. 为快速准确地评估起伏地形对仪表着陆系统下滑道的影响程度,本文提出了一种基于多劈模型的系统下滑道评估方法,并应

用该方法对实际环境中的仪表着陆系统下滑道进行了评估,结果表明应用该方法能准确、有效地预测机场起伏地形对仪表着陆系统下滑道造成的影响. 在应用该方法评估起伏地形对仪表着陆系统的影响时,所考虑的低阶射线对系统具有显著的影响,当考虑更高阶数射线的影响后,对系统的预测结果会更准确. 利用该方法可以实现高效和经济的地形评估,并可用于指导机场规划和建设.

参考文献:

- [1] 李跃,邱致和. 导航与定位[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 541-543.
- [2] GREVING G, SPOHNHEIMER N L. Current issues in flight inspection measurements [C]//Proceedings of 16th International Flight Inspection Symposium. Oklahoma City, OK, USA: ICASC, 2010: 183-192.
- [3] WIPF H, GREVING G. Flight inspection aircraft in multipath environment [C]//Proceedings of 12th International Flight Inspection Symposium. Oklahoma City, OK, USA: ICASC, 2002: 198-207.
- [4] GEISE R, PIESEWICZ R, ENDERS A, et al. Feasibility study on scaled bistatic RCS measurements of aircraft in W-band to investigate misguidance by the instrument-landing-system [C]//Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-4.
- [5] GEISE R, ENDERS A, VAHLE H, et al. Scaled measurements of instrument-landing-system disturbances due to large taxiing aircraft [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(3): 485-490.
- [6] GREVING G. Latest achievements of complex system simulation for ATC-systems: actual examples and flight inspection [C]//Proceedings of 16th International Flight Inspection Symposium. Oklahoma City, OK, USA: ICASC, 2010: 117-125.
- [7] 戴传金, 吴德伟, 卢燕娥, 等. 一种多径条件下的MLS接收机测角误差分析新方法[J]. 航空学报, 2010, 31(5): 983-988.
DAI Chuanjin, WU Dewei, LU Yan'e, et al. A new method of angle error analysis of microwave landing system(MLS) receiver under multipath condition [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(5): 983-988.
- [8] LUEBBERS R, UNGVICHIAN V, MITCHELL L. GTD terrain reflection model applied to ILS glide scope

[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1982, AES-18(1): 11-20.

- [9] ODUNAIYA S A, MCFARLAND R H. A cosmetic method for ameliorating multipath effects on the ILS localizer [C]//Proceedings of Position Location and Navigation Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996: 342-351.
- [10] 何国瑜, 卢才成, 洪家才, 等. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 192-196.
- [11] KOUYOMJIAN R G, PATHAK P H. A uniform theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface [J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(11): 1448-1461.
- [12] International Civil Aviation Organization. Convention on international civil aviation: annex 10 Aeronautical communications: volume 1 Radio navigation aids [M]. 6th ed. Montreal, Quebec, Canada: ICAO, 2006: 3.14-3.18.

[本刊相关文献链接]

采用矩谐分析和支持向量机的地磁导航基准图构建方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(10): 47-51.

地面运动目标不模糊径向速度估计的方法. 西安交通大学学报, 2009, 43, (8): 76-79.

利用角度测量估计机动目标运动参数的方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 67-71.

大范围视觉伺服方法在空间机器人上的应用. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 85-89.

一种新的浅海目标方位估计方法. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1295-1299.

一种基于角度测量估计飞行目标运动参数的新方法. 西安交通大学学报, 2008, 42(8): 986-990.

多源二维测角信息的三维动态目标跟踪定位算法. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 462-465.

超声波绝对定位的全方位移动机械手导航研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(3): 337-341.

一种基于接收信号强度指示的改进型定位算法. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 147-151.

基于综合导向的轮式移动机器人自适应轨迹跟踪控制. 西安交通大学学报, 2005, 39(3): 252-255.

基于地磁定轨和扩维卡尔曼滤波的导航算法. 西安交通大学学报, 2004, 38(12): 1315-1318.

车辆无陀螺航位推算系统的导航原理及其算法. 西安交通大学学报, 2001, 35(12): 1284-1287.

(编辑 葛赵青)