基于面元分组的电磁遮挡算法及其优化

姬金祖 刘战合

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 用物理光学法计算复杂目标的雷达散射截面(RCS, Radar Cross Section)时, 通过面元沿电磁波入射方向的重叠关系和景深来判断面元之间的遮挡. 将面元投影在与电磁波入射方向垂直的平面上进行分组, 使同组的面元距离相近. 在计算中只需对同组的面元判断遮挡关系, 避免了所有面元的两两遮挡判断, 从而节省计算时间, 并对分组进行了优化, 使计算时间最少. 算例表明, 基于面元分组的遮挡判断方法可行, 能够大大提高计算效率.

关 键 词: 物理光学法; 遮挡; 面元; 分组; 雷达散射截面

中图分类号: V 218

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)04-0453-04

Electromagnetic occultation algorithm based on facets grouping and optimization

Ji Jinzu Liu Zhanhe

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: When calculating complex target's radar cross section(RCS) with physical optics(PO) method, the facets shadowing relationship was judged through overlapping and depth-of-view of facets along the incident wave direction. The facets were projected on the plane that was perpendicular with the incident wave direction and then grouped to several groups to make sure that the distance of facets in the same group were close. Only the facets in the same group needed to be judged whether they are shadowed or not instead of making the judgement between all of the facets thus the calculating time was saved. The grouping size was optimized to make the the calculating time be the least. The calculating examples showed that this method is feasible and can make the calculating more efficient.

Key words: physical optics(PO); occultation; facets; grouping; radar cross section(RCS)

物理光学法(PO, Physical Optics)是一种计算雷达散射截面(RCS, Radar Cross Section)的高频近似法, 具有算法简单、通用性强、计算速度快的优点. 在计算大型、复杂目标时, 将表面离散成许多三角形面元, 计算各面元RCS并按相位叠加, 得到整个目标的RCS[1-2].

PO法假设之一是阴影部分电流为0, 故位于阴影部分的面元对整个目标的电磁散射并没有贡献[3]. 背对电磁波的面元显然位于阴影区, 但朝向电磁波的面元也可能被目标的其他部分遮挡而位于阴影区. 判断遮挡的一种方法是将目标所有的面元两两进行遮挡判断, 优点是没有误差, 但计算量大, 耗时长, 效率不高. 另一种方法是利用网格单元的拓扑关系进行, 但这种方法仅适用于腔体, 而且在计算过程中, 需要先对整个腔体剖分的网格单元按照拓扑关系从腔体曲面的一端到另一端按照环状结构排序, 建模复杂[4]. 还有一种方法是用随机变量的统计方法对面元进行遮挡判断, 求得净面积, 但误差较大, 达5%, 而且目标趋于复杂时, 误差增大[5].

本文提出一种面元分组的思路, 计算速度快, 而且没有误差, 很好地协调了计算速度与误差的

收稿日期: 2008-04-23

作者简介: 姬金祖(1982-), 男, 陕西延安人, 博士生, jijinzu@ase.buaa.edu.cn.

矛盾.

1 目标面元间的遮挡判断算法

1.1 目标表面离散

将三维实体模型表面离散成三角形面元, 优点是任何大的光滑表面都可以用若干三角形面元来逼近[1]. 根据物理光学法的假设, 阴影区对散射没有贡献, 因此阴影区的三角形面元不参与物理光学法的计算.

法向朝向电磁波的面元称之为亮面元, 否则称之为暗面元, 只有亮面元才有可能被电磁波直接照射. 景深指空间三角形重心的位置矢量在电磁波入射方向的投影长度, 景深越小, 则离雷达越近, 越有可能被电磁波照射. 本文只讨论亮面元的遮挡判断问题.

本文约定, 在某平面上的投影相交的 2个空间三角形, 称它们关于此平面相叠. 这里的平面三角形可以是退化三角形, 即 3个点位于同一直线. 2个相叠的空间三角形, 如果一个景深比另一个大, 则认为此三角形被另一个三角形遮挡.

1.2 遮挡判断准则

对封闭实体而言, 所有的亮面元与暗面元在投影面上的投影所成的形状是相同的, 故判断亮面元是否被遮挡, 只要判断是否被其他亮面元遮挡即可. 因此, 一个面元位于阴影区须满足以下 2个条件之一:

1) 面元是暗面元;

2) 面元是亮面元且至少被另一个亮面元遮挡, 算法流程图如图 1所示.

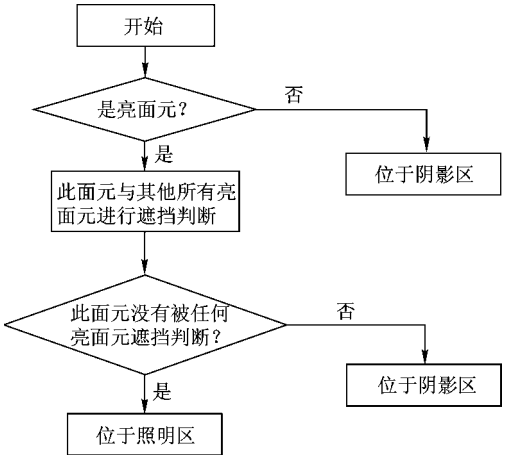


图 1 面元遮挡判断流程

1.3 遮挡判断算法

文献[6]给出了面元遮挡的几种方法, 如极大极小检验法、Roberts算法、包含性检验算法等, 但都是针对多边形, 算法较复杂. 本文采用投影法, 即先将面元投影, 再判断相叠. 具体步骤如下:

1) 在投影面 (过原点且与入射波垂直的平面)上建立直角坐标系

设雷达所在位置的球坐标为 $\{r, \theta, \varphi\}$, 则坐标轴 $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ 可以设为

$$\boldsymbol{a} = \{-\sin\varphi, \cos\varphi, 0\} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{b} = \{-\cos\theta\cos\varphi, -\cos\theta\sin\varphi, \sin\theta\} \quad (2)$$

入射方向为

$$\boldsymbol{i} = \{-\sin\theta\cos\varphi, -\sin\theta\sin\varphi, -\cos\theta\} \quad (3)$$

以上 $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ 互相正交.

2) 计算三角形面元的投影和景深

空间点 G 的投影在投影面坐标系下的坐标为 $\{\alpha, \beta\}$, 则 $\alpha = G \cdot a$, $\beta = G \cdot b$, 由此计算三角形投影坐标.

设三角形面元顶点为 $\boldsymbol{P}, \boldsymbol{Q}, \boldsymbol{R}$, 则景深为

$$d = (\boldsymbol{P} + \boldsymbol{Q} + \boldsymbol{R}) \cdot \boldsymbol{i}/3 \quad (4)$$

3) 判断面元相叠

相叠问题归结为判断平面三角形相交, 条件是有相交的边或者一个三角形的顶点位于另一个三角形内部.

假设线段 AB 和 CD 的端点坐标分别是 $\{\alpha_A, \beta_A\}$, $\{\alpha_B, \beta_B\}$, $\{\alpha_C, \beta_C\}$, $\{\alpha_D, \beta_D\}$, 则两线段相交的充要条件是同时满足 2个条件: ①A 点和 B 点在直线 CD 两侧; ②C 点和 D 点在直线 AB 两侧.

设 CD 所在直线方程是 $f_{CD}(\alpha, \beta) = 0$, 则条件①等价于下式:

$$f_{CD}(\alpha_A, \beta_A) f_{CD}(\alpha_B, \beta_B) < 0 \quad (5)$$

用同样的方法可以判断条件②.

判断一个顶点是否在另一个三角形内部可以采用矢量差积检验法[3].

4) 判断面元遮挡

2个相叠的面元, 如果其中一个景深小于另一个, 则此面元被遮挡.

若面元数是 N, 其中亮面元有 M 个, 则 $M \approx N/2$, 需要进行判断的次数是

$$M(M-1)/2 = N(N-2)/8 \quad (6)$$

其计算复杂度是 $O(N^2)$. 如果目标的所有面元都用这种方法进行遮挡判断, 运算量相当大. 假设目标被划分成了 100 000个面元, 亮面元约有 50 000个, 则遮挡判断次数约为 $50\,000 \times 49\,999/2 = 12\,499\,950\,000$次.

对具体的目标, 与一个面元相叠的面元一般不超过 10个, 大量的计算时间用在了相隔很远的面元之间的相叠判断上. 面元分组的思路就是避免投影距离很远的面元之间的遮挡判断, 而只对相距较近的面元进行.

2　面元分组后的遮挡判断

2.1　面元分组

面元分组步骤如下:

1) 在投影面上确定一个矩形的入射口面, 使所有面元投影都包含在其中, 面积为 S;

2) 将入射口面划分成许多正方形的口面元, 边长为 L, 面积为 $S=L^2$, 则口面元总数为 $K=S/L^2$;

3) 将投影与同一个口面元相交的亮面元分为一组.

由于一个面元的投影可能与多个口面元相交, 故一个面元可以属于不同的分组.

2.2　遮挡判断

一个面元是否被遮挡, 只需判断是否被本组内面元遮挡.

假设目标被划分成了 100000个面元, 亮面元约有 50 000个, 面元被分成 10 000组, 再考虑到面元可能同属于多个组, 不妨设每组有 10个面元, 则遮挡判断次数约为 $10\times 9/2\times 10\,000=450\,000$次, 是分组前的 0.036%, 减小了计算量.

3　口面元尺寸的优化选择

本节研究如何选择口面元尺寸, 以使遮挡判断次数最少. 设面元面积是 S_f, 边长是 d, 则 $S_f=\sqrt{3}d^2/4$ 对于一般目标, 假设面元投影不重叠且铺满入射口面, 则 M, d, S 的关系是

$$\sqrt{3}d^2M/4=S$$

在实际计算中, 面元尺寸会有微小差异, 面元投影不会铺满整个入射口面, 投影的面积小于面元面积, 面元投影可能相交, 口面的面积还随入射方向的不同而不同, 故上式只是估计式. 为方便分析, 将上式修改为 $d^2M/4=S$, 不会影响计算量的预估结果.

若面元投影的重心位于某口面元内, 则此面元属于此口面元的组, 但重心位于口面元外的面元仍有可能与其相交. 在计算量预估中约定, 重心离口面元边界的距离不大于 $d/4$时, 面元与口面元相交, 否则不相交 (此处相交的假设只是用于估算遮挡判断的次数, 而不用于遮挡判断). 因此, 重心位于边长 $L+2d/4$的正方形内的面元都与相关口面元相交. 又 $d^2M/4=S$ 可知 $M/S=4/d^2$, 从而一个口面元内的平均面元数是

$$T=M\frac{(L+2d/4)^2}{S}=\left(L+2\times\frac{1}{4}d\right)^2\frac{4}{d^2}=\left(\frac{2L}{d}+1\right)^2 \qquad (7)$$

判断遮挡的次数为

$$N_o=\left(\frac{2L}{d}+1\right)^2\left[\left(\frac{2L}{d}+1\right)^2-1\right]\frac{S}{2L^2} \qquad (8)$$

定义 $L/d=\lambda$为口面元因子. 由 $M/S=4/d^2$, 用 M 表示 S, 式 (8)成为

$$N_o=\frac{S}{2d^2}\times\frac{1}{\lambda^2}(2\lambda+1)^2\times[(2\lambda+1)^2-1]=\frac{M}{8}f(\lambda) \qquad (9)$$

其中 $f(\lambda)=\frac{1}{\lambda^2}(2\lambda+1)^2[(2\lambda+1)^2-1]$, $\lambda>0$

经过简单计算, 可知 $\lambda=(-1+\sqrt{5})/4\approx 0.3$ 时, f 取到最小值, 此时口面元尺寸约是面元尺寸的 0.3倍. 将 $\lambda=(-1+\sqrt{5})/4$代入式 (9)得

$$N_o=\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^4\frac{M}{8}=0.8568M \qquad (10)$$

假设目标有 100 000个面元, 亮面元约为50000个, 则总共判断次数约为 42 838次, 是分组前的 0.0034%, 计算量大大下降.

4　算例验证

4.1　计算方法验证

1) 算例分析

通过简单目标的计算验证上述算法. 模型为一个去掉一个圆柱的球, 球半径为 0.25m, 圆柱半径是 0.1m, 圆柱底面到球心距离是 0.15m. 以球心为原点建立直角坐标系, 圆柱轴心为 x 轴, 圆孔朝向 x 轴负方向. 面元尺寸为 0.005 m, 共78470个, 计算网格如图 2所示.

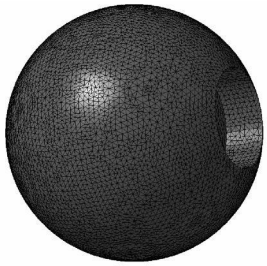


图 2　目标三角面元

设雷达在 xy 平面旋转, 雷达波长为 0.03m, 口面元边长为 0.0015m. 计算结果如图 3所示.

根据物理光学法, 入射波长为 0.03 m 时, 半径 0.25 m 球体的 RCS是 -6.997 3 dBsm, 半径 0.1m的圆板垂直入射时 RCS是 11.392 7 dBsm. 方位角位于 -90°~ 90°时, 电磁波只照射到球体,

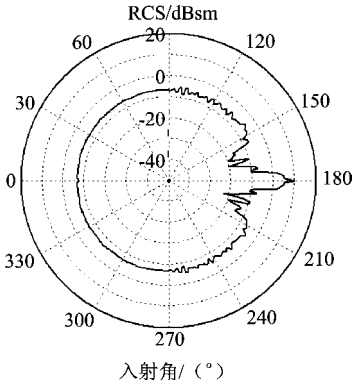


图 3 目标 RCS图

故目标的 RCS等于球体的 RCS 方位角为 180°时, 圆孔的底面被电磁波垂直照射, 故目标的 RCS近似等于平板的 RCS

2) L对 N_o的影响

以上述算例来研究 L对 N_o的影响. 设雷达的极坐标为 $(r, 80°, 10°)$, 经判断 M 为 39368 实际计算中, N_o如表 1所示, 其中 K 为 1表示没有分组.

表 **1** L对计算的影响

L/m	λ	K	T	N_o
0.0006	0.12	695556	0.11128	1026890
0.0015	0.3	111556	0.7034	725732
0.015	3	1156	67.9	2705296
0.15	30	16	4904	70779424
0.5	100	1	39368	774900028

由表 1可知, λ为 0.3时, 所需 N_o最小, 验证了前述的理论结果. 可见, 较好的分组能够使得遮挡判断更有效率. 需要注意的是, 如果目标比较复杂, 则 0.3的可能不是最优的口面元因子, 但仍然可以大大减小计算量.

4.2 复杂目标计算分析

采用上述方法对某型飞机模型进行 RCS计算. 三角面元共有 98136个, 尺寸为 0.06m, L取为 0.02m. 入射波长为 0.05m, 仰角 0°. 计算网格和计算结果如图 4和图 5所示.

计算结果表明, 该飞机两侧的 RCS较大, 峰值可达近 40dBsm, 主要垂直于垂尾方向的镜面反射所致. 在 30°和 150°方位附近, RCS较小. 头向 RCS总体而言较小, 但 0°附近由于进气道的影响, 有较小波峰.

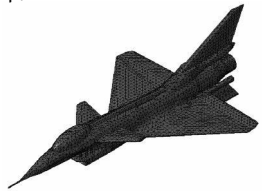


图 4 某型飞机三角面元

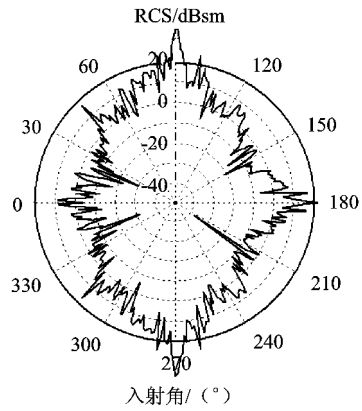


图 5 某型飞机的 RCS图

5 结 论

在应用物理光学法对目标进行 RCS计算时, 采用面元分组法进行遮挡判断, 能够大大提高效率, 可达分组前 0.0034%. 对于一般目标, 分组时采用的 λ以 0.3为宜. 理论分析和实例计算都表明, 基于面元分组的算法能够非常有效地提高遮挡判断效率, 节省计算时间.

参考文献 (**References**)

[1] 阮颖铮. 雷达散射截面 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1988
Ruan Yingzheng. Radar cross section [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1988(in Chinese)

[2] Johnson J T, Warnick K F, Xu Peng. On the geometrical optics (Hagfors' law) and physical optics approximations for scattering from exponentially correlated surfaces[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 2007, 45(8): 2619-2629

[3] 黄沛霖. 大型、复杂耦合散射目标的 RCS计算方法研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 2003
Huang Peilin. Research on RCS computing technique of large-scale and complicated coupling scattering object[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese)

[4] 李争亭, 胡毕富, 席平. 腔体 RCS计算前置处理中网格单元的相互遮挡判断 [J]. 工程图学学报, 2008, 29(1): 61-66
Li Zhengting, Hu Bifu, Xi Ping. Mutual occlusion evaluation of ductmesh elements in processing of RCS calculation[J]. Journal of Engineering Graphics, 2008, 29(1): 61-66(in Chinese)

[5] 陈海涛, 卞恩荣. 武装直升机红外辐射计算中多重遮挡处理 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(4): 391-394
Chen Haitao, Bian Enrong. New algorithm of processing multiocculation and its application in infrared radiation calculation of military helicopter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(4): 391-394(in Chinese)

[6] 周建江, 舒永泽. 简单形体目标电磁遮挡算法研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(1): 97-101
Zhou Jianjiang, Shu Yongze. Research on electromagnetic shadowing algorithm of simple targets of simple targets[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1995, 27(1): 97-101(in Chinese)

(责任编辑: 赵海容)