

基于复射线方法的导电平板散射问题分析

赵为粮^{1,3}, 杜惠平¹, 阮颖铮², 刘元安³

(1. 重庆邮电学院, 重庆 400065; 2. 电子科技大学, 四川成都 610054; 3. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 本文通过建立导电平板反射场分析模型, 利用复射线方法特别是角域中的复射线近轴近似方法, 有效地实现了导电平板在整个后向范围内散射场的计算, 同时计算精度可以由复射线展开参数 N 来加以控制. 有关的数值计算结果及其与参考解的比较证实了本文所用方法的正确性和有效性, 以及所具有的推广应用价值.

关键词: 电磁散射; 导电平板; 复射线方法; 复射线展开参数

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 09-1402-03

Analysis on the Scattering of Conducting Plate by Complex Ray Method

ZHAO Wei2liang^{1,3}, DU Hu2ping¹, RUAN Ying2zheng², LIU Yuan2an³

(1. Chongqing Univ. of Posts & Telecomm., Chongqing 400065, China;

2. Univ. of Electronic Science & Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China;

3. Beijing Univ. of Posts & Telecomm., Beijing 100876, China)

Abstract: All backscattering field s intensity from conducting plate can be calculated by complex ray method, especially complex ray paraxial approximation in angle domain through modeling the conducting plate. In the meantime the calculating accuracy of the field s intensity can be controlled by modulating complex ray expansion parameter N . Comparison between the numerically calculated result and analytic solution proves that the method used in this paper is efficient and correct and it is applicable to other cases.

Key words: EM scattering; conducting plate; complex ray method; complex ray expansion parameter

1 引言

作为典型的简单散射体之一, 导电平板的散射构成分析散射问题的一个经典问题^[1,2]. 一般认为, 作为高频散射问题典型分析方法的几何光学射线方法, 由于散射体曲率为无限大, 因而不能用于分析导电平板的散射^[1-3]. 为了计算其散射场分布, 可以采用一致性几何绕射方法、物理光学法以及矩量法等方法. 有关结果表明^[2], 平面波入射时该目标的散射场分布类似于平面同相均匀口径的辐射.

文献[4]中采用复射线方法(复射线展开和复射线近轴近似)^[3]对加吸波涂层材料前后的导电平板散射场分布进行了分析. 这时, 首先将入射平面波离散化为一组平行的复射线场, 通过反复尝试的方法使后者在空间中的分布趋近于前者, 以得出复射线间隔 S 和复射线波束宽度 b 这些复射线展开参量. 出于与几何光学方法类似的原因, 作者采用了复射线方法来计算正后向散射方向及其邻域内的场, 而用边缘绕射场来计算更大观察范围上的场分布. 其中, 可由复射线场计算得出的观察范围非常小, 并与复射线展开参数的具体选择有关.

文献[5]中, 对以复射线拟合入射平面波时的复射线展开参数选择方案, 进行了深入的研究. 作者将相邻复射线中线上的场与复射线轴线上的场相比较, 定义了复射线展开精度的细节性描述方法. 通过分析, 引入一个单一的复射线展开参数 $N(N = S^2/2kb)$ 来控制复射线展开精度. 进一步的分析指出, N 的取值越小, 则采用复射线展开时拟合出的平面波精度越高.

基于这一工作, 有可能通过复射线展开的方法, 利用复射线处理手段进行更大范围的平板散射场计算. 这是因为, 由于复射线展开参数 N 的选择能保证复射线场的展开精度, 而通

过调整一个展开参量 S 或 b , 则有可能实现这一目标. 事实上, 在我们的分析中又进一步发现, 在叠加各复射线近轴近似场的基础上, 只要进行一个/去加权(归一化)的处理, 则完全利用复射线方法得到整个后向散射的结果. 而且, 有关结果的精度只与复射线展开参数 N 的取值有关, 与展开参量 S 或 b 的实际取值(电尺寸)无关.

以下内容中, 我们在介绍分析模型的基础上, 通过数值计算对有关分析方法及其结果进行说明.

2 分析模型)) 平板反射场的计算方法

考察图1中所示的平板散射场计算的几何关系. 由 x 轴上出发的一条平行于 y 轴的复射线交目标于 $A(x_1, y_1)$ 点, 并经平板反射后形成轴线指向 $P(Q, U)$ 点的复射线反射线. 目标中心位于 $O_c(0, y_0)$ 点, 并相对于 x 轴形成倾斜角 H 角. 当观察点位于目标散射的远区时, 轴线上的复射线场可以近似

$$\langle(P) \sim C \frac{\exp(-jkL_1)}{\sqrt{L_1}} \exp(kb) \quad (1)$$

这里, $L_1 = Q + y_1$. 对应地, 利用角域的近轴近似表示, $P_c(Q, U)$ 点处由该复射线产生的近轴近似场可以表示为^[6,7]

$$\langle(P_c) \sim \langle(P) \exp\left[-2kb \left(\frac{F}{2}\right)^2\right] \exp[-jk(Q_c - Q)] \quad (2)$$

当同时采用多条复射线来拟合入射平面波时, 则平面波入射时 $P_c(Q, U)$ 点处的散射场可以表示为

$$\langle(P_c) \sim \sum_m \langle(P_m) \exp\left[-2kb \left(\frac{F_m}{2}\right)^2\right] \exp[-jk(Q_c - Q)_m] \quad (3)$$

这里, $(Q_c - Q)_m$ 表示与第 m 条复射线对应的相位修正量. 考

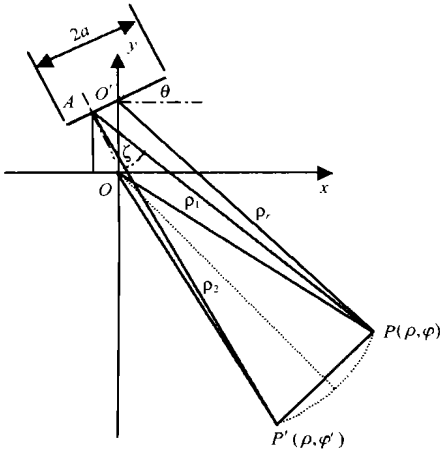


图 1 平板散射场计算的几何关系

考虑到叠加各条复射线所导致的量值的变化,上述场表达式可以进一步归一化为

$$\langle P_c \rangle \sim \frac{\sum_m \langle P_m \rangle \exp \left[-2kb \left(\frac{F_m}{2} \right)^2 \right] \exp \left[-jk(Q_2 - Q_1)_m \right]}{\sum_m \exp \left[-2kb \left(\frac{F_m}{2} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

将 $2M+1$ 个复源点按 x 坐标由小(负)到大(正)从 $m=0$ 开始排序.以第 $m=M$ 个复源点为参考,则由图示几何关系和射线追踪结果可以进一步得出有关关系式.特别地,当 $H=0$ 且 α_c 与 O 点重合时,其关系简化为

$$\left. \begin{aligned} (Q_1)_m &= \sqrt{Q^2 - [(m-M)S]^2} \\ (Q_2)_m &= \sqrt{Q^2 + [(m-M)S]^2 + 2Q|m-M|S} \cos \alpha_c \\ (Q_2 - Q_1)_m &= U(m-M)S \cos \alpha_c \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$F_m U \frac{P}{2} + \arcsin \left(\frac{Q \sin \alpha_c}{(Q_2)_m} \right) \quad (6)$$

这里, S 为复源点之间的间距.为了便于与参考解进行比较,因而在上述式中 U 均改写为 U .

作为对照的参考解,可以选择均匀分布口径平面所产生的远区场表达式

$$f(U) = \frac{\sin \left[ka \sin \left(U + \frac{P}{2} \right) \right]}{ka \sin \left(U + \frac{P}{2} \right)} \quad (7)$$

这里,已选择 U 的取值范围为 $(-180^\circ, 0^\circ)$.

3 数值计算结果)) 复射线近轴近似计算结果

在不同目标参数和复射线展开参数选择方案下,我们得到了图2~4中所示的一组结果.其中,复射线展开参数的确定办法是:

(1)根据精度要求确定复射线展开参数 $N, N = S^2 / 2bK$ S 为均匀分布的复源点之间的间距; b 为复源点波束宽度参量,其量纲与波长相同; K 为波长;

(2)考虑到远区观察点通常选择为球(极)坐标系表示,参照圆柱面散射时平面波入射和远区场柱面分布描述之间的关系,确定直角坐标源分布和极坐标场分布之间对应关系.一种做法是以散射体最大线尺度来代替原问题中圆柱面直径 $2R_0$,从圆柱面散射分析^[6,7]中所定义的关系式

$$N = NR_0^2 = Nb^2 / a^2$$

出发,来寻求具有较好精度时 N 的取值;

(3)在上述参数选择基础上,可以唯一地确定实际需要的复射线展开参数(S, b)的取值.

进一步考察两个展开参数之间的关系及其对计算结果精度的影响.事实上,针对平板反射这一具体问题,从复射线展开参数的定义上可以看出

$$S = \sqrt{2aK} \sqrt{N}; \quad b = a \sqrt{N} / N$$

这意味着,就复射线展开参数的调整而言,如果在改变 N 取值的同时保持 Nb 不变,则 S 的取值不变,而 b 的取值将会变化;另一方面,如果在改变 N 取值的同时保持 N/N 不变,则 b 的取值不变,而 S 的取值将会变化.

图2中所示的计算结果说明了复射线展开参数 N 不同取值时,散射场计算结果与式(7)参考结果的比较.应当指出,后者零点位置与目标尺寸关系密切,而复射线展开法计算时会引入不大于 S 的目标尺寸误差,从而使得二者的波形不能完全重合.为此,我们可以进而以式(7)波形的包络来作为参考.可以看出 N 的取值越小,即复源点间距越小,复射线方法计算结果的精度越高,复射线方法计算结果的波形与式(7)波形越能完全吻合.这表明, N 是一个控制计算精度的重要的参数.图中,已选择 N 的取值为 0101.

图3中所示的计算结果说明了复射线展开参数 N 不同取值时,散射场计算结果式(3)、式(4)与式(7)参考结果包络的比较.可以看出,在保持 Nb 不变时 N 取值的改变将会影响到

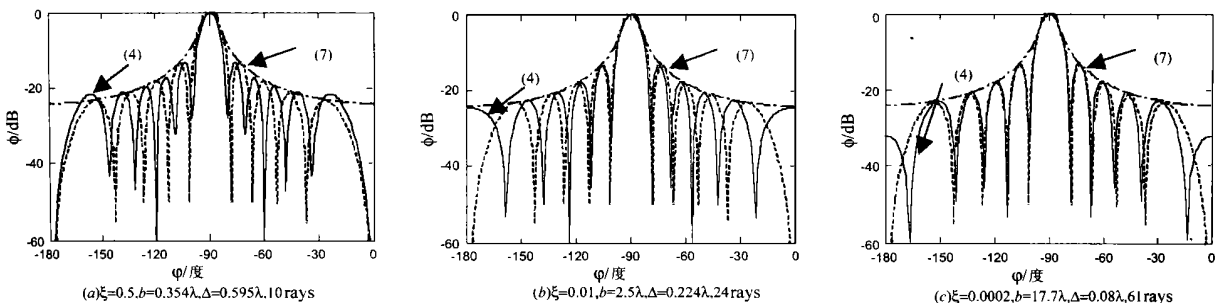


图 2 改变复射线展开参数 $N = S^2 / 2bK$ 取值时得到的一组结果(观察距离为 $10000K$, 目标尺寸为 $5K, N = 0101$)

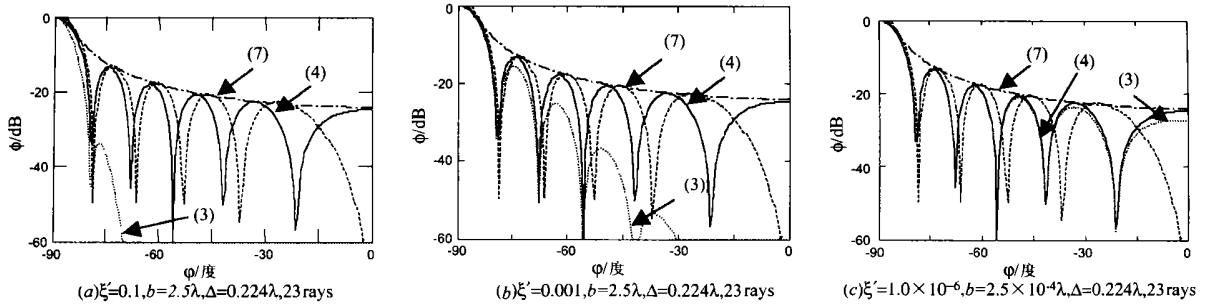


图3 改变复射线展开参数 $N_e = N_e b^2 / a^2$ 取值时得到的一组结果(观察距离为 10000K, 目标尺寸为 5K, $N_e = 0.0001$)

式(3)复射线方法的计算结果,但对式(4)的结果没有任何影响.这一结果的物理意义十分明确.由于波束宽度参量 b 描述了复源点口径尺寸,因此,当 b 的取值减小时所描述的场更趋近于球面波源,式(3)的结果更能趋近于参考结果.而另一方面,通过式(4)中所采用的对复射线近轴近似的归一化($/$ 去加 0)处理更能用复射线方法有效地描述平面波的特性.这些结果表明, N_e 同样是一个能控制计算精度的参数,但在对复射线散射场表达式进行式(4)所示的归一化处理,其取值对计算结果没有明显的影响.图中,已选择 N_e 的取值为 0.0001.

图4中所示的计算结果比较了用不同目标电尺寸下固定复源点间距 S (单位为波长)和固定 N 取值时,式(4)计算结果与式(7)包络的差值.可以看出,应用于不同目标电尺寸时,其误差指标主要由目标电尺寸(而不是 N 或 S)所确定.

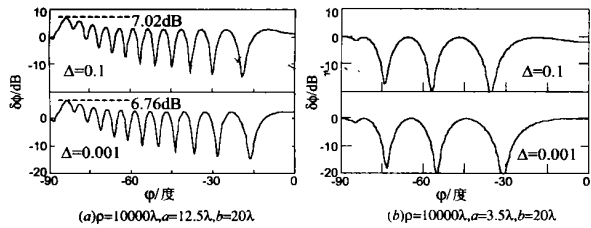


图4 不同目标电尺寸下,以式(7)包络为参考复射线解式(4)的误差.可以看出:相同 S 取值和相同 N 取值时,目标电尺寸越大,计算误差越大.

4 结束语

综上所述,通过合理地优化选择复射线展开参数^[5-7],我们利用复射线方法实现了对导电平板在整个后向范围内散射场的计算,并且计算精度可以直接由复射线展开参数 N 加以有效控制.与参考解的比较表明,用复射线方法计算平板后向散射场不仅完成了几何光学射线法所不能完成的工作,且复射线方法在不专门考虑绕射场贡献的情形下,仍然得出与参考解基本一致的结果.具有方便、简洁的优点.

有关工作的意义在于,一方面,就复射线方法在目标散射分析中的应用而言,由于平板目标是构成诸多复杂目标时常见的典型构件,因此,解决平板散射的分析问题意味着有可能进一步将复射线方法作为一种统一的分析方法应用于任意目标散射特性的分析之中.另一方面,就复射线方法本身,有关

分析进一步表明,复射线方法是介于几何光学射线和物理光学积分之间的一种分析方法.这对进一步认识复射线的物理特性并将复射线方法作进一步的推广有重要的意义.

诚然,本文工作提出了许多有待进一步加以解决的新概念和新问题.例如,在复杂的目标中如何进行复射线展开参数的统一优化设置等.这也正是我们正在进行的工作.

参考文献:

- [1] E F Knott, 等. 雷达截面理论))) 预估、测量和减缩[M]. 阮颖铮, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 1988.
- [2] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [3] 阮颖铮. 复射线理论及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1991.
- [4] 阮颖铮, 杜惠平. 吸波涂层目标散射特性的复射线分析[J]. 电子科学学报, 1992, 14(3): 254- 261.
- [5] 赵为粮, 杜惠平. 入射平面波复射线展开的精度分析[J]. 电波科学学报, 2001, 16(4): 473- 478.
- [6] 赵为粮, 杜惠平. 复射线展开法计算圆柱面对平面波散射的精度问题[J]. 电波科学学报, 2001, 17(4): 358- 364.
- [7] 赵为粮. 目标散射的复射线分析及其误差控制技术[D]. 四川成都: 电子科技大学, 2002.

作者简介:



赵为粮 男, 1962 年生于重庆铜梁, 北京邮电大学博士后, 重庆邮电学院副教授, 现从事电磁散射及复射线理论、自适应天线技术、宽带无线接入网络等方面的研究工作.



杜惠平 男, 1966 年生于山西晋城, 重庆邮电学院教授、博士, 现从事电磁散射与辐射、自适应天线技术及移动通信技术等方面的研究工作.