



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103246781 A

(43) 申请公布日 2013. 08. 14

(21) 申请号 201310186644. X

(22) 申请日 2013. 05. 17

(71) 申请人 南京理工大学

地址 210094 江苏省南京市孝陵卫 200 号

(72) 发明人 陈如山 丁大志 樊振宏 徐娟

沙侃 叶晓东 李兆龙 盛亦军

(74) 专利代理机构 南京理工大学专利中心

32203

代理人 朱显国

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006. 01)

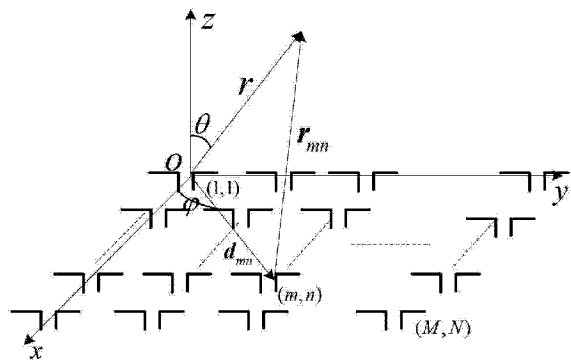
权利要求书4页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法。步骤如下：建立阵列天线模型，令单位幅度均匀平面波照射到阵列天线上，确定阵列天线的总散射场；根据方向图乘法推导出阵列天线的雷达散射截面公式，建立阵列天线空间映射粗模型，优化粗模型并确定粗模型的最优设计参量；细模型采用全波分析矩量法，通过参量提取使得粗模型的响应逼近细模型的响应，建立粗模型参量与细模型参量的映射关系；利用粗模型的最优设计参量和所建立映射关系的逆映射得到细模型的预测参量，如果细模型的预测参量不满足设计要求，对映射关系进行迭代更新，直到细模型的预测参量满足设计要求。该方法对设计的参数整体优化，在保证精确性的前提下节省了时间。



1. 一种基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法,其特征在于,步骤如下:

第 1 步,建立阵列天线模型,令单位幅度均匀平面波照射到阵列天线上,确定阵列天线的总散射场;

第 2 步,由第 1 步所得阵列天线的总散射场,根据方向图乘积法推导出阵列天线的雷达散射截面公式,建立阵列天线空间映射粗模型,优化粗模型并确定粗模型的最优设计参量;

第 3 步,细模型采用全波分析矩量法,通过参量提取使得粗模型的响应逼近细模型的响应,建立粗模型参量与细模型参量的映射关系;

第 4 步,利用第 2 步中粗模型的最优设计参量和第 3 步中所建立映射关系的逆映射得到细模型的预测参量,对细模型的预测参量进行仿真验证,判断所得响应是否满足设计要求,如果不满足,对所建立的粗模型参量与细模型参量的映射关系进行迭代更新,同时不断获取细模型新的预测参量并进行仿真验证,直到所得响应满足设计要求。

2. 根据权利要求 1 所述基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法,其特征在于,第 1 步所述建立阵列天线模型,令单位幅度均匀平面波照射到阵列天线上,确定阵列天线的总散射场,具体步骤如下:

(1.1) 建立阵列天线模型,建立 $M \times N$ 元半波偶极子阵列天线, M 行、 N 列均等间距分布,其中 M 、 N 均为正整数;以 (m, n) 表示阵列天线中的第 m 行、第 n 列的天线单元,以第 $(1, 1)$ 个天线单元为坐标原点,以第 1 列天线单元为 x 轴,以第 1 行天线单元为 y 轴,以垂直于阵列天线向上方向为 z 轴建立坐标系 xyz ,设坐标系 xyz 中任意一点的俯仰角为 θ ,水平角为 φ ;

(1.2) 忽略阵列天线中各天线单元之间的互耦,令沿 θ 方向极化的单位幅度均匀平面波照射到阵列天线上,确定阵列天线的总散射场。

3. 根据权利要求 2 所述基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法,其特征在于,第(1.2)步所述确定阵列天线的总散射场,具体步骤如下:

(1.2.1) 令沿 θ 方向极化的单位幅度均匀平面波照射到阵列天线上,磁流密度为 0,则第 (m, n) 个天线单元的散射场 $E_{m,n}^s(\mathbf{k})$ 如下:

$$E_{m,n}^s(\mathbf{k}) = \sqrt{Z} A_{m,n}(\mathbf{k}) \frac{e^{-jk \cdot \mathbf{r}_{m,n}}}{r_{m,n}} \quad (1)$$

其中, Z 是平面波阻抗, \mathbf{k} 是平面波矢量, \mathbf{r} 表示第 $(1, 1)$ 个天线单元到场点的距离矢量, $\mathbf{r}_{m,n}$ 表示第 (m, n) 个天线单元到场点的距离矢量,在远区则 $\mathbf{r} \approx \mathbf{r}_{m,n}$; $\mathbf{r}_{m,n} = \mathbf{r} - \mathbf{d}_{m,n}$, $\mathbf{d}_{m,n}$ 是从坐标原点出发的第 (m, n) 个天线单元的位置矢量; $A_{m,n}(\mathbf{k})$ 是第 (m, n) 个天线单元的波振幅矢量,具体表达式为:

$$\begin{aligned} A_{m,n}(\mathbf{k}) &= \frac{k}{4\pi j} \int_{V_{m,n}} \sqrt{Z} (\hat{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{r}}\hat{\mathbf{r}}) \cdot \mathbf{J}_1 e^{jk \cdot \mathbf{d}_{m,n}} e^{jk \cdot \mathbf{r}'} dv' \\ &= \frac{k}{4\pi j} \int_{V_{m,n}} \sqrt{Z} (\hat{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{r}}\hat{\mathbf{r}}) \cdot \mathbf{J}_1 e^{jk \cdot \mathbf{r}'} dv' \cdot e^{jk \cdot \mathbf{d}_{m,n}} \\ &= A_{1,1}(\mathbf{k}) e^{jk \cdot \mathbf{d}_{m,n}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $v_{m,n}$ 为积分区间, \hat{i} 为单位并矢; \hat{r} 为并矢; v' 为积分变量, J_1 为第 (1, 1) 个天线单元的总电流密度, $A_{1,1}(k)$ 为第 (1, 1) 个天线单元的波振幅矢量, r' 表示源的距离矢量, 即 $r' = d_{m,n}$;

(1.2.2) 将式(2)代入式(1), 则第 (m, n) 个天线单元的散射场 $E_{m,n}^s(\mathbf{k})$ 表示为:

$$\begin{aligned} E_{m,n}^s(\mathbf{k}) &= \sqrt{Z} A_{1,1}(\mathbf{k}) \frac{e^{-jk(r-d_{m,n})}}{r} e^{jk \cdot d_{m,n}} \\ &= \sqrt{Z} A_{1,1}(\mathbf{k}) \frac{e^{-jk \cdot r}}{r} e^{2jk \cdot d_{m,n}} \\ &= E_{1,1}^s(\mathbf{k}) e^{2jk \cdot d_{m,n}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $E_{1,1}^s(\mathbf{k})$ 表示第 (1, 1) 个天线单元的散射场;

(1.2.3) 令 x_m 为第 (m, n) 个天线单元的 x 轴坐标, y_n 为第 (m, n) 个天线单元的 y 轴坐标, θ 为俯仰角、 φ 水平角, 则 $\mathbf{k} \cdot d_{m,n} = k(\sin \theta \cos \varphi dx_m + \sin \theta \sin \varphi dy_n)$, 代入式(3)得到:

$$E_{m,n}^s(\mathbf{k}) = E_{1,1}^s(\mathbf{k}) e^{[2jk(\sin \theta \cos \varphi dx_m + \sin \theta \sin \varphi dy_n)]} \quad (4)$$

(1.2.4) 在不考虑天线单元互耦的情况下, 阵列天线的总散射场 $E^s(k)$ 为各天线单元散射场的叠加:

$$E^s(\mathbf{k}) = E_{1,1}^s(\mathbf{k}) \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \exp[j2k(\sin \theta \cos \varphi dx_m + \sin \theta \sin \varphi dy_n)] \quad (5)$$

4. 根据权利要求 1 所述基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法, 其特征在于, 步骤 2 中所述根据方向图乘法推导出阵列天线的雷达散射截面公式, 建立阵列天线空间映射粗模型, 优化粗模型并确定粗模型的最优设计参量, 具体步骤为:

(2.1) 将第 1 步中得到的不考虑互耦的阵列天线的总散射场 $E^s(k)$, 代入到雷达散射截面 RCS 公式, 得阵列天线的 RCS:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left| \frac{E^s}{E^i} \right|^2 = 4\pi r^2 \left| \frac{E_{1,1}^s(\mathbf{k}) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{[2jk(\sin \theta \cos \varphi dx_m + \sin \theta \sin \varphi dy_n)]}}{E^i(\mathbf{k})} \right|^2 \quad (6)$$

式中, σ 表示阵列天线雷达散射截面, $r \rightarrow \infty$ 表示在远场区, E^s 表示总散射场, E^i 表示总入射场;

(2.2) 根据辐射方向图乘积定理, 将阵列天线 RCS 表示为阵因子 RCS 与天线单元因子 RCS 之积, 具体表示形式如下:

$$\begin{aligned} \sigma(\theta, \varphi) &= \sigma_e(\theta, \varphi) \cdot \sigma_a(\theta, \varphi) \\ &= 4\pi r^2 \left| \frac{E_{1,1}^s(\mathbf{k})}{E^i(\mathbf{k})} \right|^2 \cdot \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{[2jk(\sin \theta \cos \varphi dx_m + \sin \theta \sin \varphi dy_n)]} \right|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中 σ 表示阵列天线 RCS, σ_a 表示阵因子 RCS, σ_e 表示天线单元因子 RCS 之积; 则阵因子 RCS 为:

$$\sigma_a(\theta, \varphi) = \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{[2jk(\sin \theta \cos \varphi dx_m + \sin \theta \sin \varphi dy_n)]} \right|^2 \quad (8)$$

因为阵列天线对于给定的入射波来说,天线单元的 RCS 是固定的,因此通过优化阵因子就可以实现对阵列天线的整体优化;

(2.3) 空间映射的粗模型选用忽略互耦的阵列天线的总散射场,采用遗传算法优化粗模型;

采用遗传算法来优化粗模型,待优化参量为各个天线单元的 x、y 轴坐标值,则适应度函数 fitness 为:

$$fitness = \min \left\{ \sqrt{\sum_{\theta_i} \left(10 \lg \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \exp[j2k(\sin \theta_i \cos \varphi_0 dx_m + \sin \theta_i \sin \varphi_0 dy_n)] \right|^2 \right) / N_{\theta}} \right\} \quad (9)$$

式中, $\theta_{i'}$ 为第 i' 个俯仰角, $\theta_{i'}$ 根据待优化角度 θ 的范围和所取角度的步长来确定, φ_0 为所考察水平角, N_{θ} 为俯仰角 θ 的个数;

令入射波频率为 f_0 , 波数 $k = 2\pi f_0/c$, $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 为空气中的光速,在粗模型中找到满足天线雷达散射截面设计指标的响应,对应的参量为粗模型的最优解,粗模型的最优参量值 x_c^* 表达为:

$$x_c^* = [dx_1 \quad dx_2 \quad \dots \quad dx_M \quad dy_1 \quad dy_2 \quad \dots \quad dy_N] \quad (10)$$

5. 根据权利要求 1 所述基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法,其特征在于,步骤 3 中所述细模型采用全波分析矩量法,通过参量提取使得粗模型的响应逼近细模型的响应,建立粗模型参量与细模型参量的映射关系,具体如下:

(3.1) 在细模型中验证阵列天线的 RCS,采用全波分析方法矩量法实现,待求解的优化设计问题定义为:

$$x_f^* = \arg \min_{x_f} U(R_f(x)) \quad (11)$$

其中, x 是设计变量, R_f 是关于设计变量的响应, U 是合适目标函数, x_f^* 是所求得的最优解参量值;

(3.2) 参量提取是空间映射算法的关键步骤,其目的是在粗模型变量设计空间中得到参量 x_c , 使得:

$$x_c = \min_{x_c} \|R_f(x_f) - R_c(x_c)\| \quad (12)$$

$R_f(x_f)$ 表示细模型响应, $R_c(x_c)$ 表示粗模型的响应, \min_{x_c} 表示使得 $\|R_f(x_f) - R_c(x_c)\|$ 最小的 x_c 的参量值,由上式(12)知,对于细模型的一组设计参量 x_f ,对应的粗模型空间的设计参量 x_c 便可求得,参量提取完成后,便可得到粗模型参量和细模型参量的映射关系:

$$x_c = P(x_f) \quad (13)$$

式中, P 为粗模型参量 x_c 与细模型参量 x_f 的映射关系。

6. 根据权利要求 1 所述基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法,其特征在于,步骤 4 中所述利用第 2 步中粗模型的最优设计参量和第 3 步中所建立映射关系的逆映射得到细模型的预测参量,对细模型的预测参量进行仿真验证,判断所得响应是否满足设计要求,如果不满足,对所建立的粗模型参量与细模型参量的映射关系进行迭代更新,同时不断获取细模型新的预测参量并进行仿真验证,直到所得响应满足设计要求,具体为:

(4.1) 令细模型第一次的参量值 $x_f^{(1)}$ 等于粗模型的最优参量值 x_c^* , 即:

$$\mathbf{x}_f^{(0)} = \mathbf{x}_c^* \quad (14)$$

(4.2) 当 (15) 式成立时, 算法收敛:

$$\|\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_c^*\| = \|P(\mathbf{x}_f) - \mathbf{x}_c^*\| \leq \varepsilon \quad (15)$$

其中 ε 为最大容许误差;

(4.3) 此时残余向量 f 为:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_f) \triangleq P(\mathbf{x}_f) - \mathbf{x}_c^* \approx 0 \quad (16)$$

(4.4) 渐进空间映射算法以拟牛顿迭代方式求解以下非线性方程的根 \mathbf{x}_f :

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_f) = 0 \quad (17)$$

(4.5) 若在第 i 次迭代中的细模型的参量值为 $\mathbf{x}_f^{(i)}$, 其参量提取值为 $P(\mathbf{x}_f^{(i)})$, 则第 i 次迭代中的残余向量 $\mathbf{f}^{(i)}$ 为:

$$\mathbf{f}^{(i)} = P(\mathbf{x}_f^{(i)}) - \mathbf{x}_c^* \quad (18)$$

(4.6) 则新的细模型参量值的增量步长 $h^{(i)}$ 由下式获得

$$B^{(i)} h^{(i)} = -\mathbf{f}^{(i)} \quad (19)$$

上式中 $B^{(i)}$ 是关于映射关系 P 的雅克比矩阵 J_p 的近似, J_p 可表示为

$$\mathbf{J}_p \triangleq \mathbf{J}_p(\mathbf{x}_f) = \left(\frac{\partial P^T}{\partial \mathbf{x}_f} \right)^T = \left(\frac{\partial (\mathbf{x}_c^T)}{\partial \mathbf{x}_f} \right)^T \quad (20)$$

(4.7) 通过式 (19), 得到新的细模型参量值的增量步长 $h^{(i)}$, 则细模型的第 $i+1$ 次迭代中的细模型的参量值 $\mathbf{x}_f^{(i+1)}$ 可表示为:

$$\mathbf{x}_f^{(i+1)} = \mathbf{x}_f^{(i)} + h^{(i)} \quad (21)$$

(4.8) 通过式 (21) 得到细模型下一次迭代的预测参量, 对细模型的预测参量进行仿真验证, 判断所得响应是否满足设计要求, 如果不满足, 返回步骤 (4.2), 对所建立的粗模型参量与细模型参量的映射关系进行迭代更新, 同时获取细模型新的预测参量并进行仿真验证, 直到所得响应满足设计要求。

基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法

一技术领域

[0001] 本发明属于雷达散射截面减缩技术领域,特别是一种基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法。

二背景技术

[0002] 随着探测技术的发展,目标雷达散射截面 RCS 的减缩无疑具有重大的军事意义。要对大型阵列天线进行有效地隐身设计,必须依赖强有力的电磁散射计算方法。以往针对阵列天线散射特性的研究工作,多借助于矩量法等数值算法或者基于数值算法的商用软件,然而当阵列天线规模过大时,此类方法将要耗费大量的计算资源和时间。

[0003] 应用传统的方法对大型阵列天线雷达散射截面的减缩面临着挑战,首先难以获得设计初值,即使已获得非常接近最优值的初值,如果仅应用电磁仿真软件对多参量(假设参量为 n) 进行优化,是非常耗时的,因为耗时与 2^n 成正比,这对设计参量比较大的阵列天线优化而言是难以实现的。

[0004] 空间映射方法是结合电路仿真快速性与电磁仿真准确性的新优化方法,它作为一种优化方法为解决复杂、高成本电磁仿真优化问题带来了全新的思想(J. W. Bandler, R. M. Biernacki, Shao-hua Chen, et al. Space mapping technique for electromagnetic optimization. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994, 42(12): 2536-2544.)。然而对于结构比较复杂的目标,由于粗模型不存在解析表达式或等效电路不易于描述,传统的空间映射方法将不再收敛,无法实现大型阵列天线雷达散射截面的减缩。

三发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种快速稳定的基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法,该方法内存消耗低且简单易行。

[0006] 实现本发明目的的技术解决方案为:一种基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法,步骤如下:

[0007] 第 1 步,建立阵列天线模型,令单位幅度均匀平面波照射到阵列天线上,确定阵列天线的总散射场;

[0008] 第 2 步,由第 1 步所得阵列天线的总散射场,根据方向图乘积法推导出阵列天线的雷达散射截面公式,建立阵列天线空间映射粗模型,优化粗模型并确定粗模型的最优设计参量;

[0009] 第 3 步,细模型采用全波分析矩量法,通过参量提取使得粗模型的响应逼近细模型的响应,建立粗模型参量与细模型参量的映射关系;

[0010] 第 4 步,利用第 2 步中粗模型的最优设计参量和第 3 步中所建立映射关系的逆映射得到细模型的预测参量,对细模型的预测参量进行仿真验证,判断所得响应是否满足设计要求,如果不满足,对所建立的粗模型参量与细模型参量的映射关系进行迭代更新,同时不断获取细模型新的预测参量并进行仿真验证,直到所得响应满足设计要求。

[0011] 本发明与现有技术相比,其显著优点:(1)对设计的参数整体优化:针对空间映射算法,只需找到粗模型和细模型参数空间的映射关系;(2)节省优化时间:由于把许多优化工作放到粗模型中来完成,用最少的高成本细模型仿真次数来获得满意的优化效果,所以本方法在保证结果精确性的前提下大大节省了时间;(3)操作简单:对所建立的两参量空间之间的映射关系进行不断更新、改善,同时不断对细模型新的预测设计参量进行验证,直到获得优化设计值满足要求。

[0012] 下面结合附图对本发明作进一步详细描述。

四附图说明

[0013] 图1是本发明阵列天线结构示意图。

[0014] 图2是本发明实施例中基于空间映射的天线单站 RCS 曲线与不优化时等间距的天线单站 RCS 的比较图。

五具体实施方式

[0015] 下面结合附图对本发明作进一步详细描述。

[0016] 结合图1,本发明基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法,步骤如下:

[0017] 第1步,建立阵列天线模型,令单位幅度均匀平面波照射到阵列天线上,确定阵列天线的总散射场。

[0018] (1.1)如图1所示建立阵列天线模型,建立 $M \times N$ 元半波偶极子阵列天线, M 行、 N 列均等间距分布,其中 M 、 N 均为正整数;以 (m, n) 表示阵列天线中的第 m 行、第 n 列的天线单元,以第 $(1, 1)$ 个天线单元为坐标原点,以第1列天线单元为 x 轴,以第1行天线单元为 y 轴,以垂直于阵列天线向上方向为 z 轴建立坐标系 xyz ,设坐标系 xyz 中任意一点的俯仰角为 θ ,水平角为 φ 。

[0019] (1.2)忽略阵列天线中各天线单元之间的互耦,令沿 θ 方向极化的单位幅度均匀平面波照射到阵列天线上,确定阵列天线的总散射场,具体如下:

[0020] (1.2.1)令沿 θ 方向极化的单位幅度均匀平面波照射到阵列天线上,磁流密度为0,则第 (m, n) 个天线单元的散射场 $E_{m,n}^s(\mathbf{k})$ 如下:

$$[0021] \quad E_{m,n}^s(\mathbf{k}) = \sqrt{Z} A_{m,n}(\mathbf{k}) \frac{e^{-jk \cdot \mathbf{r}_{m,n}}}{r_{m,n}} \quad (1)$$

[0022] 其中, Z 是平面波阻抗, \mathbf{k} 是平面波矢量, r 表示第 $(1, 1)$ 个天线单元到场点的距离矢量, $r_{m,n}$ 表示第 (m, n) 个天线单元到场点的距离矢量,在远区则 $r \approx r_{m,n}$; $r_{m,n} = r - d_{m,n}$, $d_{m,n}$ 是从坐标原点出发的第 (m, n) 个天线单元的位置矢量; $A_{m,n}(\mathbf{k})$ 是第 (m, n) 个天线单元的波振幅矢量,具体表达式为:

$$[0023] \quad A_{m,n}(\mathbf{k}) = \frac{k}{4\pi j} \int_{v_{m,n}} \sqrt{Z} (\hat{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{r}}) J_1 e^{jk \cdot \mathbf{d}_{m,n}} e^{jk \cdot \mathbf{r}'} dv' \quad (2)$$

$$[0024] \quad = \frac{k}{4\pi j} \int_{v_{m,n}} \sqrt{Z} (\hat{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{r}}) \cdot J_1 e^{jk \cdot \mathbf{r}'} dv' \cdot e^{jk \cdot \mathbf{d}_{m,n}}$$

$$[0025] \quad = A_{1,1}(\mathbf{k}) e^{jk \cdot \mathbf{d}_{m,n}}$$

[0026] 式中, $v_{m,n}$ 为积分区间, \hat{i} 为单位并矢; \hat{r} 为并矢; v' 为积分变量, J_1 为第 (1, 1) 个天线单元的总电流密度。 $A_{1,1}(k)$ 为第 (1, 1) 个天线单元的波振幅矢量, r' 表示源的距离矢量, 即 $r' = d_{m,n}$ 。

[0027] (1. 2. 2) 将式 (2) 代入式 (1), 则第 (m, n) 个天线单元的散射场 $E_{m,n}^s(k)$ 表示为:

$$[0028] \quad E_{m,n}^s(k) = \sqrt{Z} A_{1,1}(k) \frac{e^{-jk(r-d_{m,n})}}{r} e^{jk \cdot d_{m,n}}$$

$$[0029] \quad = \sqrt{Z} A_{1,1}(k) \frac{e^{-jk \cdot r}}{r} e^{2jk \cdot d_{m,n}} \quad (3)$$

$$[0030] \quad = E_{1,1}^s(k) e^{2jk \cdot d_{m,n}}$$

[0031] 其中, $E_{1,1}^s(k)$ 表示第 (1, 1) 个天线单元的散射场;

[0032] (1. 2. 3) 令 x_m 为第 (m, n) 个天线单元的 x 轴坐标、 y_n 为第 (m, n) 个天线单元的 y 轴坐标, θ 为俯仰角、 φ 水平角, 则 $k \cdot d_{m,n} = k(\sin \theta \cos \varphi dx_m + \sin \theta \sin \varphi dy_n)$, 代入式 (3) 得到:

[0033]

$$E_{m,n}^s(k) = E_{1,1}^s(k) e^{[2jk(\sin \theta \cos \varphi dx_m + \sin \theta \sin \varphi dy_n)]} \quad (4)$$

[0034] (1. 2. 4) 在不考虑天线单元互耦的情况下, 阵列天线的总散射场 $E^s(k)$ 为各天线单元散射场的叠加:

[0035]

$$E^s(k) = E_{1,1}^s(k) \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \exp[j2k(\sin \theta \cos \varphi dx_m + \sin \theta \sin \varphi dy_n)] \quad (5)$$

[0036] 第 2 步, 由第 1 步所得阵列天线的总散射场, 根据方向图乘积法推导出阵列天线的雷达散射截面公式, 建立阵列天线空间映射粗模型, 优化粗模型并确定粗模型的最优设计参量。

[0037] 推导出的忽略互耦的阵列天线的 RCS 公式, 是天线单元的 RCS 与阵因子 RCS 的乘积。对于给定的阵列天线, 天线单元的 RCS 是不变的, 只要优化阵因子 RCS 就可以实现对整个阵列的优化。由遗传算法对阵因子 RCS 进行优化, 得到满足设计要求的阵列排布; 由方向图相乘原理得到忽略互耦的阵列天线的 RCS, 作为空间映射的粗模型。

[0038] (2. 1) 将第 1 步中得到的不考虑互耦的阵列天线的总散射场 $E^s(k)$, 代入到雷达散射截面 RCS 公式, 得阵列天线的 RCS:

[0039]

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left| \frac{E^s}{E^i} \right|^2 = 4\pi r^2 \left| \frac{E_{1,1}^s(k) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{[2jk(\sin \theta \cos \varphi dx_m + \sin \theta \sin \varphi dy_n)]}}{E^i(k)} \right|^2 \quad (6)$$

[0040] 式中, σ 表示阵列天线雷达散射截面, $r \rightarrow \infty$ 表示在远场区, E^s 表示总散射场, E^i 表示总入射场。

[0041] (2. 2) 根据辐射方向图乘积定理, 将阵列天线 RCS 表示为阵因子 RCS 与天线单元因子 RCS 之积, 具体表示形式如下:

[0042]

$$\sigma(\theta, \varphi) = \sigma_e(\theta, \varphi) \cdot \sigma_a(\theta, \varphi)$$

[0043]

$$= 4\pi r^2 \left| \frac{E_{1,1}^s(\mathbf{k})}{E^i(\mathbf{k})} \right|^2 \cdot \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{[2jk(\sin\theta \cos\varphi dx_m + \sin\theta \sin\varphi dy_n)]} \right|^2 \quad (7)$$

[0044] 其中 σ 表示阵列天线 RCS, σ_a 表示阵因子 RCS, σ_e 表示天线单元因子 RCS 之积;

[0045] 则阵因子 RCS 为:

[0046]

$$\sigma_a(\theta, \varphi) = \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{[2jk(\sin\theta \cos\varphi dx_m + \sin\theta \sin\varphi dy_n)]} \right|^2 \quad (8)$$

[0047] 因为阵列天线对于给定的入射波来说, 天线单元的 RCS 是固定的, 因此通过优化阵因子就可以实现对阵列天线的整体优化。

[0048] (2.3) 空间映射的粗模型选用忽略互耦的阵列天线的总散射场, 采用遗传算法优化粗模型。

[0049] 采用遗传算法来优化粗模型, 待优化参量为各个天线单元的 x、y 轴坐标值, 则适应度函数 fitness 为:

[0050]

$$fitness = \min \left\{ \sqrt{\sum_{\theta_i} \left(10 \lg \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \exp[j2k(\sin\theta_i \cos\varphi_0 dx_m + \sin\theta_i \sin\varphi_0 dy_n)] \right|^2 / N_\theta \right)} \right\} \quad (9)$$

[0051] 式中, θ_i 为第 i' 个俯仰角, θ_i 根据待优化角度 θ 的范围和所取角度的步长来确定, φ_0 为所考察水平角, N_θ 为俯仰角 θ 的个数;[0052] 令入射波频率为 f_0 , 波数 $k = 2\pi f_0/c$, $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 为空气中的光速, 在粗模型中找到满足天线雷达散射截面设计指标的响应, 对应的参量为粗模型的最优解, 粗模型的最优参量值 x_c^* 表达为:

$$x_c^* = [dx_1 \ dx_2 \ \dots \ dx_M \ dy_1 \ dy_2 \ \dots \ dy_N] \quad (10)$$

[0054] 第 3 步, 细模型采用全波分析矩量法, 通过参量提取使得粗模型的响应逼近细模型的响应, 建立粗模型参量与细模型参量的映射关系。

[0055] (3.1) 在细模型中验证阵列天线的 RCS, 采用全波分析方法矩量法实现, 待求解的优化设计问题定义为:

$$x_f^* = \arg \min_{x_f} U(R_f(x)) \quad (11)$$

[0057] 其中, x 是设计变量, R_f 是关于设计变量的响应, U 是合适目标函数, x_f^* 是所求得的优化问题的最优解参量值。[0058] (3.2) 参量提取是空间映射算法的关键步骤, 其目的是在粗模型变量设计空间中得到参量 x_c , 使得:

$$x_c = \min_{x_c} \|R_f(x_f) - R_c(x_c)\| \quad (12)$$

[0060] $R_f(x_f)$ 表示细模型响应, $R_c(x_c)$ 表示粗模型的响应, \min_{x_c} 表示使得 $\|R_f(x_f) - R_c(x_c)\|$ 最小的 x_c 的参量值, 由上式 (12) 知, 对于细模型的一组设计参量 x_f , 对应

的粗模型空间的设计参量 x_c 便可求得,参量提取完成后,便可得到粗模型参量和细模型参量的映射关系:

$$[0061] \quad x_c = P(x_f) \quad (13)$$

[0062] 式中, P 为粗模型参量 x_c 与细模型参量 x_f 的映射关系。

[0063] 第 4 步,利用第 2 步中粗模型的最优设计参量和第 3 步中所建立映射关系的逆映射得到细模型的预测参量,对细模型的预测参量进行仿真验证,判断所得响应是否满足设计要求,如果不满足,对所建立的粗模型参量与细模型参量的映射关系进行迭代更新,同时不断获取细模型新的预测参量并进行仿真验证,直到所得响应满足设计要求,优化过程才最终收敛和成功。具体过程如下:

[0064] (4.1) 令细模型第一次的参量值 $x_f^{(0)}$ 等于粗模型的最优参量值 x_c^* , 即:

$$[0065] \quad x_f^{(0)} = x_c^* \quad (14)$$

[0066] (4.2) 当 (15) 式成立时,算法收敛:

$$[0067] \quad \|x_c - x_c^*\| = \|P(x_f) - x_c^*\| \leq \varepsilon \quad (15)$$

[0068] 其中 ε 为最大容许误差;

[0069] (4.3) 此时残余向量 f 为:

$$[0070] \quad f = f(x_f) \triangleq P(x_f) - x_c^* \approx 0 \quad (16)$$

[0071] (4.4) 渐进空间映射算法以拟牛顿迭代方式求解以下非线性方程的根 x_f :

$$[0072] \quad f = f(x_f) = 0 \quad (17)$$

[0073] (4.5) 若在第 i 次迭代中的细模型的参量值为 $x_f^{(i)}$, 其参量提取值为 $P(x_f^{(i)})$, 则第 i 次迭代中的残余向量 $f^{(i)}$ 为:

$$[0074] \quad f^{(i)} = P(x_f^{(i)}) - x_c^* \quad (18)$$

[0075] (4.6) 则新的细模型参量值的增量步长 $h^{(i)}$ 由下式获得

$$[0076] \quad B^{(i)} h^{(i)} = -f^{(i)} \quad (19)$$

[0077] 上式中 $B^{(i)}$ 是关于映射关系 P 的雅克比矩阵 J_p 的近似, J_p 可表示为

$$[0078] \quad J_p \triangleq J_p(x_f) = \left(\frac{\partial P^T}{\partial x_f} \right)^T = \left(\frac{\partial (x_c^T)}{\partial x_f} \right)^T \quad (20)$$

[0079] (4.7) 通过式 (19), 得到新的细模型参量值的增量步长 $h^{(i)}$, 则细模型的第 $i+1$ 次迭代中的细模型的参量值 $x_f^{(i+1)}$ 可表示为:

$$[0080] \quad x_f^{(i+1)} = x_f^{(i)} + h^{(i)} \quad (21)$$

[0081] (4.8) 通过式 (21) 预测细模型下一次迭代的参量值, 如果细模型预测参量值进行精确空间仿真所得响应能够满足设计要求, 所得细模型预测参量值即为电路优化设计值; 否则, 返回步骤 (4.2), 对所建立的粗模型参量与细模型参量的映射关系进行不断更新、改善, 同时不断获取细模型新的预测参量值并进行验证, 直到获得优化设计值满足要求, 优化过程才最终收敛和成功。

[0082] 实施例 1

[0083] 为了验证本文方法的正确性与有效性, 下面分析了阵列天线选取如图 1 排布的

6×6 元平面阵,即 $M = 6$ 、 $N = 6$,天线单元选取工作频率为 1GHz 的半波偶极子天线。天线单元间距与优化的范围在 $[0.55\lambda_g, \lambda_g]$ mm 之间。算例在主频 1.86GHz、内存 2GB 的个人计算机上实现。

[0084] 图 2 中虚线表示天线单元等间距(x 轴方向的天线单元间距为 $0.5\lambda_g$ mm, y 轴方向的天线单元间距为 $0.5\lambda_g$ mm)的单站 RCS 的计算值,实线表示本发明优化间距后的计算结果,可见在入射角 $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ 的大部分角域,天线的单站 RCS 要比等间距的要低,这也充分证明了基于空间映射算法的大型阵列天线雷达散射截面(RCS)的减缩方法的有效性。

[0085] 综上所述,本发明基于空间映射的阵列天线雷达散射截面减缩方法基本流程如下:在粗糙模型中优化,得到粗糙模型最优解;在精细模型中进行验证;通过参数提取过程建立粗糙模型设计变量空间与精细模型设计变量空间的映射关系,更新精细模型的代理模型(由映射关系校正后的粗糙模型);对细模型设计值作出预测。该方法对设计的参数整体优化,针对空间映射算法,只需找到粗模型和细模型参数空间的映射关系,此外,把许多优化工作放到粗模型中来完成,用最少的高成本细模型仿真次数来获得满意的优化效果,在保证结果精确性的前提下大大节省了时间。

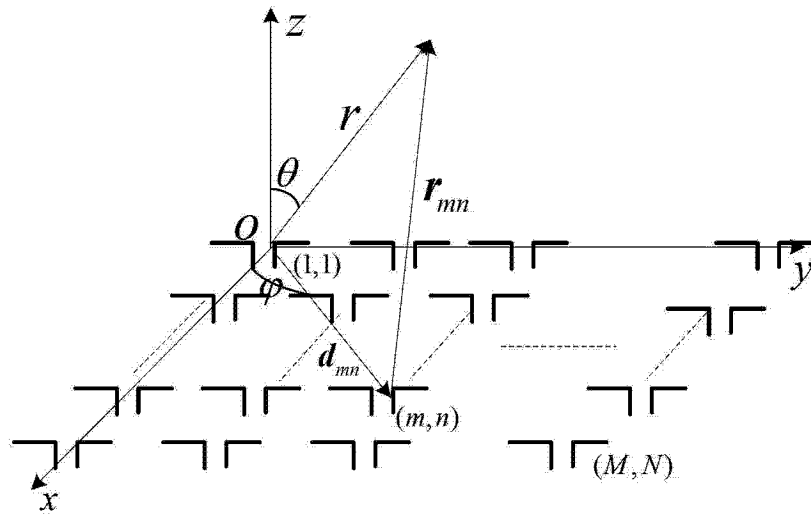


图 1

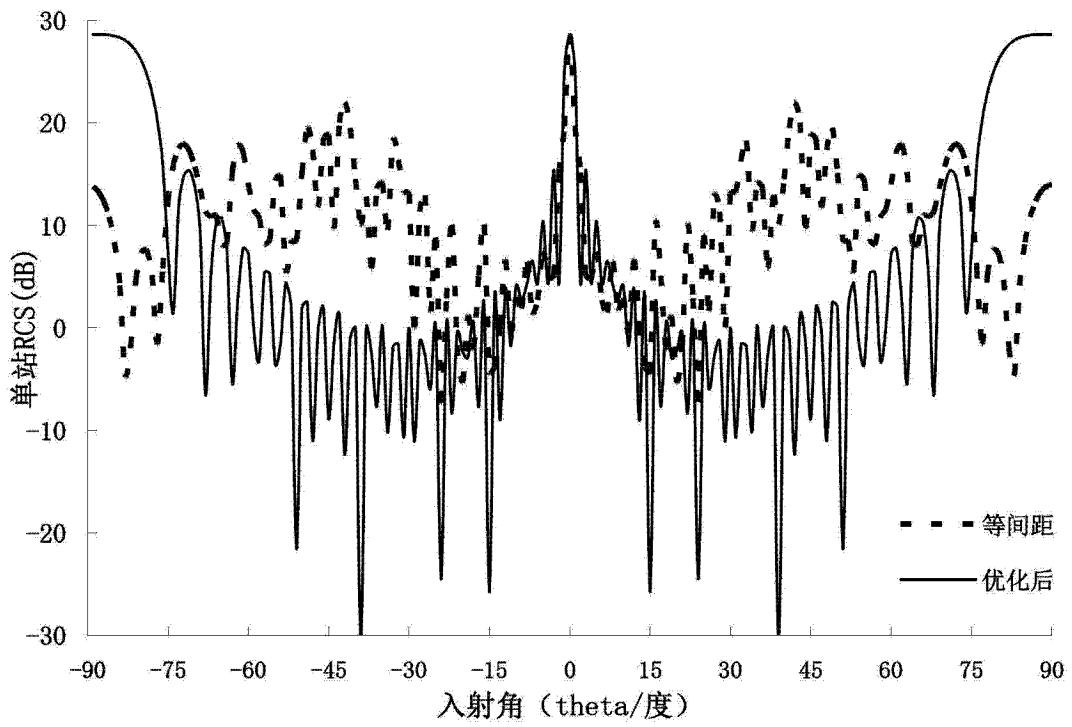


图 2