

天线散射理论研究

(西安电子科技大学天线与微波技术重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文给出单端口天线和多端口天线阵列的基础散射理论, 该理论清晰地说明了天线散射的原理. 以该理论为基础, 可以得到求解天线散射场的方法, 从而解决了长久以来天线散射场中结构模式项散射和天线模式项散射之间的相位差难以确定的问题. 本文工作对天线隐身有重要意义.

关键词: 天线; 阵列; 散射; 结构模式项散射; 天线模式项散射; 隐身

中图分类号: O441 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)09-1611-F-03

Theoretic Study of Antenna Scattering

LIU Ying, GONG Shurxi, FU De-min

(National Laboratory of Antennas and Microwave Technology of Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The basic scattering theory of one port antenna and multiple ports antenna array is illustrated, thus clearly clarify the scattering of antenna. Based on the theory, methods can be got to give the antenna mode scattering and structural mode scattering respectively. The work is meaningful for antenna stealth.

Key words: antenna; antenna array; scattering; structural mode scattering; antenna mode scattering; stealth

1 引言

天线的散射通常包括两部分: 一部分是与散射天线负载情况无关的结构模式项散射场, 它是天线接匹配负载时的散射场, 其散射机理与普通散射体的散射机理相同; 另一部分则是随天线负载情况变化的天线模式项散射场, 它是由于负载与天线不匹配而反射的功率经天线再辐射而产生的散射场, 这是天线作为一个加载散射体而特有的散射场. 本文给出我们提出的天线散射的基本理论, 该理论可清晰地说明天线的散射机理.

2 单端口天线散射理论

如图1所示, 在天线馈线的单模传输区取一横截面 S_1 , 命 (a_0, b_0) 为馈电传输线中(参考面处)入射和出射波的幅度. 天线外空间的场用矢量球面波函数作展开, 场的球面波展开式可以表示为:

$$E = \sum_i (a_i e_i^{\text{in}} + b_i e_i^{\text{out}}) \quad (1)$$

其中 $(a_i, b_i) (i \neq 0)$ 为场的球面波展开式中的第 i 个入射和出射球面波的复幅度, e_j 表示球面波展开的基函数, 上标 in 和 out 分别表示入射和出射. 则天线的特性可用散射矩阵^[1]完整地加以表征, 散射矩阵表达式如下:

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{00} & S_{01} & S_{02} & \cdots \\ S_{10} & S_{11} & S_{12} & \cdots \\ S_{20} & S_{21} & S_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

或简记为

$$[b] = [S][a] \quad (2)$$

由式(2)有

$$b_0 = \sum_{j=0} S_{0j} a_j = S_{00} a_0 + \sum_{j=1} S_{0j} a_j \quad (\text{反射/接收幅度}) \quad (4)$$

上式中第一项表示在端口 S_1 处由入射波 a_0 产生的反射场幅度, 第二项表示由入射球面波 a_i 在端口处产生的接收场幅度.

$$b_i = \sum_{j=0} S_{ij} a_j = S_{i0} a_0 + \sum_{j=1} S_{ij} a_j \quad (\text{辐射/散射幅度}) \quad (5)$$

上式中第一项为由入射波 a_0 在天线外空间产生的辐射场幅度, 第二项表示由入射球面波 a_i 在天线外空间产生的散射场幅度.

对于辐射问题, $a_i = 0 (i \neq 0)$, 因此有

$$b_0 = S_{00} a_0 \quad (\text{反射幅度}) \quad (6)$$

$$b_i = S_{i0} a_0 \quad (\text{辐射幅度}) \quad (7)$$

$$S_{00} = \Gamma_a = (Z_{in} - Z_c) / (Z_{in} + Z_c) \quad (\text{天线反射系数}) \quad (8)$$

对于接收和散射问题, 有

$$a_0 = \Gamma_l b_0 \quad (9)$$

$$\Gamma_l = (Z_l - Z_c) / (Z_l + Z_c) \quad (\text{接收机负载反射系数}) \quad (10)$$

在端口 S_1 左端接匹配负载时, $a_0 = 0$, 由式(4)得此时散

$$\text{射的接收幅度为 } b_0|_{a_0=0} = \sum_{j=1} S_{0j} a_j = b_0^m \quad (11)$$

定义为匹配接收幅度. 在一般负载情况下的接收幅度与 b_0^m 的关系为:

$$b_0 = \frac{1}{1 - \Gamma_L S_{00}} \quad ; \quad S_{0j} a_j = \frac{1}{1 - \Gamma_L S_{00}} b_0^m \quad (12)$$

由式(5)、(9)得到

$$b_k = \sum_{j=0} S_{kj} a_j = S_{k0} \Gamma_L b_0 + \sum_{j=1} S_{kj} a_j \quad (13)$$

同理定义 b_i^m 为匹配散射幅度, 表达如下

$$b_i^m = \sum_{j=1} S_{ij} a_j \quad (14)$$

将式(11)、(14)带入式(13)可得到散射幅度表达式

$$b_i = b_i^m + \frac{\Gamma_L}{1 - \Gamma_L \Gamma_a} b_0^m S_{i0} \quad (15)$$

由式(1)可知, 将上式中的展开系数分别都乘以展开基函数后进行线性求和即可得到散射场, 由此我们得到天线散射场基础理论公式:

$$\mathbf{E}^s(Z_l) = \mathbf{E}^s(Z_c) + \frac{\Gamma_L}{1 - \Gamma_L \Gamma_a} b_0^m \mathbf{E}_1 \quad (16)$$

简记为 $\mathbf{E}^s(Z_l) = \mathbf{E}^s(Z_c) + \mathbf{E}^a(Z_l)$ (17)

式(16)中, 第一项被称为结构模式项散射场, 它对应接收机端接匹配负载情形的散射电场。天线接匹配负载时, $Z_l = Z_c$, $\Gamma_L = 0$, 入射波被完全吸收, 没有出射波, 这时对应的散射场为结构模式项散射场。

第二项被称为天线模式项散射场, b_0^m 为匹配状态下的接收幅度, \mathbf{E}_1 表示单位幅度激励情形的辐射电场。当天线接任意负载时, 会有波传输到天线端口, 在天线端口又会有部分波反射回负载, 这个过程会一直进行下去, 这个过程对应的波可以表示为

$$b_0^m [1 + \Gamma_L \Gamma_a + (\Gamma_L \Gamma_a)^2 + \dots] = b_0^m \frac{1}{1 - \Gamma_L \Gamma_a}$$

经过负载反射后入射波为 $\frac{\Gamma_L}{1 - \Gamma_L \Gamma_a} b_0^m$, \mathbf{E}_1 表示单位幅度激励情形的辐射电场, 在任意负载状态下, 该入射波相当于一激励, 则此时的天线端口处辐射电场就是式(16)中的第二项, 即为天线散射场中的天线模式项散射场。

前面给出了天线散射基础理论公式, 从此公式再进行推导可得到实现天线 RCS 减缩的一些方法, 另外从该公式出发经过推导也可以得到以往存在的天线散射的经典公式^[2~4], 由此可以证明该理论的正确性。以该公式为基础, 我们可以分别计算出天线散射场中的结构模式项散射和天线模式项散射, 文献[5]计算了一个天线散射场的结果, 分别给出了结构模式项散射场和天线模式项散射场, 从而解决了长久以来天线散射场中两种模式散射场之间的相位关系难以确定的问题。

3 多端口天线阵列散射基础理论公式

单端口天线散射的研究前面给出了详细的公式, 多端口天线阵列的散射比较复杂, 以往还未见到文献对天线阵列给出研究。本文给出多端口天线阵列的理论研究结果, 经过推导证明天线阵列的散射也可以分为结构模式项散射场和天线模式项散射场两部分。并给出由不同负载状态(即不同反射系数状态)天线的已知散射场确定任意负载状态下散射场的过程。

多端口天线阵列如图2所示, 设天线有 r 个馈电口, 第

个口($i = 1, 2, \dots, r$)入射模(假定单模传输)的复振幅为 a_i , 出射模的复振幅为 b_i 。

天线周围的场可用球面波矢量波函数为基作展开, 对这些模加以标号, 依次为 $r+1, r+2, \dots$, 第 i 个入射球面

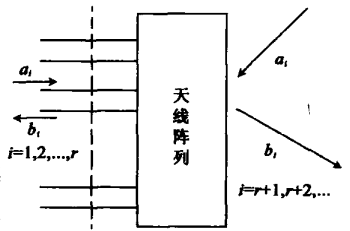


图2 多端口天线示意图

模和出射模的复振幅分别为 a_i, b_i ($i = r+1, \dots$)。

这样天线系统可视为一个具有无限个端口的网络, 出射模和入射模的复振幅间的关系通过散射矩阵联系起来。

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_r \\ b_{r+1} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \dots & S_{1r} & S_{1r+1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{r1} & \dots & S_{rr} & S_{rr+1} & \dots \\ S_{r+11} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_r \\ a_{r+1} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

用分块矩阵表示如下:

$$\begin{bmatrix} [b]_r \\ [b]_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [S]_{rr} & [S]_{rs} \\ [S]_{sr} & [S]_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [a]_r \\ [a]_s \end{bmatrix}$$

$$\text{即} \quad [b]_r = [S]_{rr} [a]_r + [S]_{rs} [a]_s \quad (18)$$

$$[b]_s = [S]_{sr} [a]_r + [S]_{ss} [a]_s \quad (19)$$

$[a]_r$ 与 $[b]_r$ 的关系为

$$[a]_r = [\Gamma]_{rr} [b]_r \quad (20)$$

式中 $[\Gamma]_{rr} = \text{diag}(\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_r)$, Γ_i ($i = 1, 2, \dots, r$) 是第 i 个端口向负载方向看过去的反射系数。

将式(20)分别代入式(18)和(19), 经整理后得

$$[b]_r = \{[I]_{rr} - [S]_{rr} [\Gamma]_{rr}\}^{-1} [S]_{rs} [a]_s \quad (21)$$

$$[b]_s = [S]_{sr} [\Gamma]_{rr} [b]_r + [S]_{ss} [a]_s \quad (22)$$

当天线的 r 个端口均接匹配负载时, 有 $\Gamma_i = 0$ ($i = 0, 1, \dots, r$), 则由式(21)、(22), 得

$$[b]_r \big|_{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_r=0} = [S]_{rs} [a]_s \sim [b]_r^m \quad (\text{匹配接收向量}) \quad (23)$$

$$[b]_s \big|_{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_r=0} = [S]_{ss} [a]_s \sim [b]_s^m \quad (\text{匹配接收向量}) \quad (24)$$

将式(23)、(24)代入式(22), 并考虑到式(21), 得

$$[b]_s = [b]_s^m + [S]_{ss} [\Gamma]_{rr} \{[I]_{rr} - [S]_{rr} [\Gamma]_{rr}\}^{-1} [b]_r^m \quad (25)$$

命 $\{[I]_{rr} - [S]_{rr} [\Gamma]_{rr}\}^{-1}$ 的第 j 行第 k 列的元素为 C_{jk} ($j, k = 1, 2, \dots, r$), 则式(25)可改写为

$$b_i = b_i^m + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r S_{ij} \Gamma_j C_{jk} b_k^m, \quad (i = r+1, r+2, \dots)$$

上式两端乘以第 i 个外行矢量球面波函数 S_i 求和得

$$\sum_{i=r+1} b_i S_i = \sum_{i=r+1} b_i^m S_i + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r \left(\sum_{i=r+1} S_i S_j \right) \Gamma_j C_{jk} b_k^m \quad (26)$$

由 S_{ij} ($i = r+1, r+2, \dots; j = 1, 2, \dots, r$) 的定义可知, $\sum_{i=r+1} S_i S_j$ 表示仅当第 j 个端口单位幅度源激励, 其它端口均接匹配时天线在自由空间的辐射场, 记为 \mathbf{E}_j^u , 于是式(26)可进一步表示为

$$\mathbf{E}^s([\Gamma]_r) = \mathbf{E}^s([0]_r) + \sum_{j=1}^r \left[\sum_{k=1}^r C_{jk} b_k^m \right] \Gamma_j \mathbf{E}_j^{1t} \quad (27)$$

该式即天线阵列散射场基础理论公式。

$$\text{上式中 } [\Gamma]_r = [\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_r]^T$$

$$[0]_r = \underbrace{[0, 0, \dots, 0]}_{r \uparrow}$$

式(27)的意义说明如下:

$\mathbf{E}^s([\Gamma]_r)$ 表示 r 个端口负载反射系数向量为 $[\Gamma]_r$ 时天线的散射场;

$\mathbf{E}^s([0]_r)$ 表示 r 个端口处匹配状态时天线的散射场, 即结构模式项散射场;

$b_1^m, b_2^m, \dots, b_r^m$ 分别表示在匹配状态下, 第 1、第 2、...、第 r 个端口的接收波的幅度, 当各端口不匹配时, 第 j 个端口接收波的幅度变成了 $\sum_{k=1}^r C_{jk} b_k^m$, 它乘以 Γ_j 后表示第 j 个端口入射

向天线的幅度, 所以 $\sum_{j=1}^r \left[\sum_{k=1}^r C_{jk} b_k^m \right] \Gamma_j \mathbf{E}_j^{1t}$ 表示天线再辐射引起的天线模式项散射场。至此我们完成了天线阵列散射基础理论公式的推导, 可以看出阵列的散射同样可以分为结构模式项散射场和天线模式项散射场两部分。

知道了天线阵列散射的基础理论公式后, 我们给出由不同负载状态(即不同反射系数状态)天线的已知散射场确定任意负载状态下散射场的过程。

式(27)可重写如下:

$$\mathbf{E}(\Gamma_1, \dots, \Gamma_r) = \mathbf{E}^s(\underbrace{0 \dots 1}_r) + \sum_{j=1}^r \left[\sum_{k=1}^r C_{jk} \Gamma_j b_k^m \mathbf{E}_k^{1t} \right]$$

$$= \mathbf{E}_s^s + [C_{11}\Gamma_1, C_{12}\Gamma_1, \dots, C_{1r}\Gamma_1; \dots; C_{r1}\Gamma_r, \dots, C_{rr}\Gamma_r]$$

$$\begin{bmatrix} b_1^m \mathbf{E}_1^{1t} \\ \vdots \\ b_r^m \mathbf{E}_r^{1t} \end{bmatrix}$$

$$= [C_{11}\Gamma_1, C_{12}\Gamma_1, \dots, C_{1r}\Gamma_1; \dots; C_{r1}\Gamma_r, \dots, C_{rr}\Gamma_r; 1]$$

$$\begin{bmatrix} b_1^m \mathbf{E}_1^{1t} \\ \vdots \\ b_r^m \mathbf{E}_r^{1t} \\ \mathbf{E}_s^s \end{bmatrix} \quad (28)$$

应当注意在上述表达式中的 $C_{ij} (i, j = 1, \dots, r)$ 是 $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_r$ 的函数, 因为 C_{jk} 是 $[[I]_r - [S]_r [\Gamma]_r]^{-1}$ 的元素。

在式(28)中取 $r^2 + 1$ 组不同的反射系数: $\Gamma_1^j, \Gamma_2^j, \dots, \Gamma_r^j$,

($k = 1, 2, \dots, r^2 + 1$), 如果相应的散射场已知, 则有

$$[E]_{r^2+1} = [D]_{r^2+1, r^2+1} [X]_{r^2+1} \quad (29)$$

$$\text{其中 } [E]_{r^2+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}^s(\Gamma_1^1, \Gamma_2^1, \dots, \Gamma_r^1) \\ \mathbf{E}^s(\Gamma_1^2, \Gamma_2^2, \dots, \Gamma_r^2) \\ \vdots \\ \mathbf{E}^s(\Gamma_1^{r^2+1}, \Gamma_2^{r^2+1}, \dots, \Gamma_r^{r^2+1}) \end{bmatrix}$$

假定是已知的; $[X]_{r^2+1}$ 代表式(28)中右端的那个列向量;

$[D]_{r^2+1, r^2+1}$ 的第 j 行为 $[C_{11}\Gamma_1^j, C_{12}\Gamma_1^j, \dots, C_{1r}\Gamma_1^j; \dots; C_{r1}\Gamma_r^j, \dots, C_{rr}\Gamma_r^j; 1]$ 。取 Γ_i^j 使 D 可逆并易求逆, 从而有

$$[X]_{r^2+1} = [D]_{r^2+1, r^2+1}^{-1} [E]_{r^2+1} \quad (30)$$

将式(30)代入(28)可得天线在任意负载状态下的散射场

$$\mathbf{E}^s(\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_r) = [C_{11}\Gamma_1, C_{12}\Gamma_1, \dots, C_{1r}\Gamma_1; \dots; C_{r1}\Gamma_r, \dots, C_{rr}\Gamma_r; 1] [D]_{r^2+1, r^2+1}^{-1} [E]_{r^2+1} \quad (31)$$

取 $r = 1$ (单端口) 的情况, 此时 $r^2 + 1 = 2$, 取两种反射状态, $\Gamma_1^1 = -1$ 和 $\Gamma_1^2 = 1$ 。经过推导即可得到与前面单端口公式相吻合的结果。由此也证明了多端口天线阵列散射基础公式的正确性。

4 总结

本文给出单端口天线与多端口天线阵列散射的基础理论公式, 该理论清晰地说明了天线散射的原理。以该理论为基础, 可以得到求解天线散射场的方法, 从而解决了长久以来天线散射场中结构模式项散射和天线模式项散射之间的相位差难以确定的问题。本文工作对天线隐身有重要意义。

参考文献:

- [1] E F Knott, John Shaeffer, Michael Tuley. Radar Cross Section[M]. 2nd edition, New York: Artech House, 1993.
- [2] Collin R E. The Receiving Antenna, Antenna Theory, Part I[M]. R E Collin and F J Zucker (eds.), New York: McGraw-Hill, 1969. 123-133.
- [3] Hansen R C. Relationships between antennas as scatterers and as radiators[J]. Pro IEEE, 1989, 77(5): 659-662.
- [4] Green R B. The General Theory of Antenna Scattering[R]. Report 1223-17, USA: Antenna Laboratory, Ohio State University, 1963.
- [5] Ying Liu, DeMin Fu, Shi Xi Gong, A novel model for analyzing the RCS of microstrip antenna[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Application, 2003, 17(9): 1301-1310.

作者简介:

刘 英 女, 1977 年生于河南省周口市, 博士, 主要研究方向有电磁学数值方法研究, 电大尺寸目标 RCS 分析, 天线 RCS 减缩, 微带天线, 基站天线等。E-mail: liuying@mail.xidian.edu.cn.

龚书喜 男, 1957 年生于河北省霸州, 博士, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁理论、电磁辐射、电磁散射与隐身技术等。

傅德民 男, 1941 年生于陕西省临潼县, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向及感兴趣的领域为天线的近远场变换理论、辐射与散射的近场测量、天线的数值分析与设计等。