

计算共形阵单元互耦的新方法*

柴舜连 姚德森 毛钧杰

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

摘要 本文在比较直接积分法(DIM)和表面辐射图(SRP)法的基础上,提出了用修正表面辐射图(MSRP)的新方法来计算任意形状曲面上波导辐射单元的互耦。通过对圆柱阵单元的计算表明,MSRP法既具有DIM法的准确性,又具有SRP法的简单性,同时能方便地处理任意指向(极化)单元的互耦问题。

关键词 共形阵, 互耦, 修正的表面辐射图法

分类号 TN814

A New Approach to the Mutual Coupling Calculation of Conformal Array

Chai Shunlian Yao Demiao Mao Junjie

(Institute of Electronic Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract Based on direct integration method (DIM) and surface radiation pattern method (SRP), a new modified surface radiation pattern (MSRP) method is suggested for the calculation of the mutual coupling from waveguide antenna elements on conformal surfaces. The results of the cylinder indicate that MSRP is more accurate than SRP and better than DIM. MSRP is also good at dealing with the mutual coupling of elements with arbitrary polarization.

Key words conformal array, mutual coupling, MSRP

共形阵的研究自70年代以来,一直为人们所重视。它主要采用模式法^[1]和几何绕射理论^[2]来进行分析。这些研究仍主要集中在圆柱、圆锥和球体等典型结构上。而实际的机头或弹头,往往是旋转抛物面、正切卵形或其它非典型结构。对于这些结构,模式分析法往往是困难的,而几何绕射理论比较适用。

* 1997年8月26日修订

本文根据一致性几何绕射理论得出的任意曲面上波导共形阵辐射单元互耦的一般表达式, 运用三种方法来计算互耦, 并进行了比较。

1 任意曲面上单元的互耦

P. H. Pathak 等人在总结圆柱和球的几何绕射场的基础上, 提出了任意曲面的一致几何绕射场公式^[3]。设曲面上两点 Q' 和 Q , 它们的三标架坐标分别为 $(\hat{i}', \hat{n}', \hat{b}')$ 和 $(\hat{i}, \hat{n}, \hat{b})$, Q' 点一磁流点源 $d\bar{M}_m$ 在点 Q 产生的表面场 $d\bar{H}_m$ 可表示为,

$$d\bar{H}_m = d\bar{H}_i \hat{i} + d\bar{H}_b \hat{b} \quad (1)$$

其中, $dH_i = T_{i' i'} d\bar{M}_{i'} + T_{i' b'} d\bar{M}_{b'}$, $dH_b = T_{b' b'} d\bar{M}_{b'} + T_{b' i'} d\bar{M}_{i'}$, $dM_{i'}$ 、 $dM_{b'}$ 分别是 $d\bar{M}_m$ 的 \hat{b}' 、 \hat{i}' 分量, 文献 [3] 给出了 $T_{i' i'}$ 、 $T_{i' b'}$ 、 $T_{b' b'}$ 、 $T_{b' i'}$ 的表达式, 且 $T_{i' b'} = T_{b' i'}$ 。限于篇幅, 这里略去。

对于两个波导元, 设只有主模 TE_{10} 工作, 则波导口表面场为^[4]

$$\bar{E}_a = V \bar{e} = V \hat{y} \sqrt{\frac{2}{ld}} \cos\left(\frac{\pi}{l} x\right) \quad (2)$$

V 为模式电压, \bar{e} 为矢量模函数, l 、 d 为波导元的尺寸。这里采用了波导元的局部坐标系。

$$d\bar{M}_m = \bar{E}_a \times \hat{n} ds = \bar{M} ds \quad (3)$$

根据反应原理^[5], 单元互导纳的一般表达式为

$$y = - \frac{\iint_{S_2} dS_2 \iint_{S_1} dS_1 \bar{M}_1 \cdot \bar{y}_m \cdot \bar{M}_2}{V_1 V_2} \quad (4)$$

其中, $\bar{y}_m = \hat{b} \hat{b}' T_{b' b'} + \hat{i} \hat{i}' T_{i' i'} + (\hat{b} \hat{i}' + \hat{i} \hat{b}') T_{b' i'}$ 。

2 互耦的计算方法

式 (8) 是单元互耦的一般表达式, 我们采用下面三种方法来计算, 目的是为了进行比较, 得出计算共形阵互耦的准确而有效的方法。

2.1 直接积分法 (DIM)

将 (3) 式代入式 (4), 可以进一步化为

$$y = - \frac{2}{ab} \iint_{S_2} dS_2 \iint_{S_1} dS_1 \cos\left(\frac{\pi}{l} x_1\right) g_m \cos\left(\frac{\pi}{l} x_2\right) \quad (5)$$

其中, $g_m = T_{b' b'} \cos(\omega_1) \cos(\omega_2) + T_{i' i'} \sin(\omega_1) \sin(\omega_2) + T_{b' i'} \sin(\omega_1 + \omega_2)$, ω_1 、 ω_2 是 Q' 到 Q 的短程线与 \hat{b}' 、 \hat{b} 的夹角。这是四重积分。尽管直接积分法可得到比较高的计算精度, 但对一般的曲面共形阵而言, 它的计算需要较长 CPU 时间, 而且积分的上下限的确定也不容易。为此我们寻找近似的计算方法。

2.2 表面辐射图法 (SRP)

当两单元的尺寸与它们间的短程线相比很小时, 可以近似地以它们中心之间的单一短程线来代表整个表面的短程线, 这样可以简化计算^[6]。

$$y = P(\omega_{10}) P(\omega_{20}) \cdot g_{m0} \quad (6)$$

其中,

$$g_{m0} = T_{b' b'} \cos(\omega_{10}) \cos(\omega_{20}) + T_{i' i'} \sin(\omega_{10}) \sin(\omega_{20}) + T_{b' i'} \sin(\omega_{10} + \omega_{20})$$

$$P(\omega) = j \frac{2}{\pi} \sqrt{2ld} C\left(\frac{kl}{2} \cos(\omega)\right) S\left(\frac{kd}{2} \sin(\omega)\right)$$

$$C(x) = \frac{\cos(x)}{1 - (2x/\pi)^2}, S(x) = \frac{\sin(x)}{x} \quad (7)$$

ω_{10} 、 ω_{20} 是两单元中心点的短程线与 \hat{b}' 、 \hat{b} 的夹角。由于 $P(\omega)$ 是与波导尺寸有关的表面辐射图，因而我们称这种方法为表面辐射图法。

由(6)式可见，SRP法得到了完全的解析式，因而计算量小。但当单元间距比较小时，这种方法得出的结果不精确。为此，我们提出了修正的表面辐射图的新方法。

2.3 修正的表面辐射图法 (MSRP)

当单元间距与单元尺寸相比较小时，我们可以假想，如果把波导元分为若干小单元，对每个小单元而言，满足SRP法的假设条件，那么小单元间的互耦可以采用类似的过程推导出，整个波导元的互耦是这些小单元互耦的迭加。将波导口长边窄边分别分为 n 份和 m 份，即分成 $n \times m$ 个小单元，有：

$$y = - \iint_{S_2} dS_2 \iint_{S_1} dS_1 \sqrt{\frac{2}{ld}} \cos\left(\frac{\pi}{l} x_1\right) \cdot g_m \cdot \sqrt{\frac{2}{ld}} \cos\left(\frac{\pi}{l} x_2\right)$$

$$= - \sum_{i=1}^{n \times m} \sum_{j=1}^{n \times m} \iint_{S_{2j}} dS_{2j} \iint_{S_{1i}} dS_{1i} \sqrt{\frac{2}{ld}} \cos\left(\frac{\pi}{l} x_{1i}\right) \cdot g_m \cdot \sqrt{\frac{2}{ld}} \cos\left(\frac{\pi}{l} x_{2j}\right)$$

$$= - \sum_{i=1}^{n \times m} \sum_{j=1}^{n \times m} y_{ij} \quad (8)$$

$$\text{其中, } y_{ij} = \iint_{S_{2j}} dS_{2j} \iint_{S_{1i}} dS_{1i} \sqrt{\frac{2}{ld}} \cos\left(\frac{\pi}{l} x_{1i}\right) \cdot g_m \cdot \sqrt{\frac{2}{ld}} \cos\left(\frac{\pi}{l} x_{2j}\right)$$

仿照SRP法的推导过程，有：

$$y_{ij} = \frac{2}{ld} g_{ij} P_{1i} P_{2j} \quad (9)$$

其中，

$$g_{ij} = T_{w'} \cos(\omega_{1i}) \cos(\omega_{2j}) + T_{u'} \sin(\omega_{1i}) \sin(\omega_{2j}) + T_{w''} \sin(\omega_{1i} + \omega_{2j})$$

$$P_{pq} = \frac{d}{m} S\left(\frac{kd}{2m} \sin(\omega_{pq})\right) \frac{l}{2n} \left[e^{j\pi x_{q0}/l} S\left(\left(\frac{\pi}{l} + k \cos(\omega_{1q})\right) \frac{l}{2n}\right) + e^{-j\pi x_{q0}/l} S\left(\left(\frac{\pi}{l} - k \cos(\omega_{1q})\right) \frac{l}{2n}\right) \right]$$

($p=1, 2, \dots, n$, $q=i, j$)， P_{pq} 是小单元的表面辐射图，因此我们称这种方法为修正的表面辐射图法。

3 计算结果

为了对这三种方法进行分析比较，我们以圆柱波导阵进行了计算。圆柱半径 $a=1.52\lambda$ ，单元尺寸 $l=0.69\lambda$ ， $d=0.3\lambda$ ，波导单元为周向分布，单元距离用轴向距离 z 和周向夹角 α 表示。

表1 MSRP 法的收敛情况 ($z=1.53\lambda, \alpha=0$)

N	M	幅度 (dB)	相位 ($^{\circ}$)
2	1	-17.30	-108.08
3	2	-17.66	-110.05
4	3	-17.62	-109.98
6	4	-17.60	-110.03
DIM		-17.57	-110.04

首先我们检验 MSRP 法的收敛过程, 结果如表 1 所示。当 $n>3, m>2$ 时, MSRP 法可得到与 DIM 法较一致的结果, 误差小于 0.3%。

正如我们想象的那样, 当两元的短程线距离比较小时, SRP 法的计算结果与 DIM 法相比, 误差比较大; 当它们距离比较大时, SRP 法的计算结果的误差比较小。然而 MSRP 法计算的结果始终与 DIM 法的结果保持很好的一致, 结果如表 2、表 3 所示。这说明我们提出的修正的表面辐射图法优于 DIM 和 SRP 方法。表中还列出了模式法的结果^[2], 几何绕射理论的结果与模式法基本相符。

另外, 共形阵的设计中为了消除交叉极化的影响, 有些波导元作了一定的扭转。设两元的极化方向与轴线的夹角分别为 δ_1 和 δ_2 。SRP 和 MSRP 能方便地求出任意单元极化的互耦。计算结果图 1 所示, 随着扭转角的增加, 互耦的幅度逐渐减小。

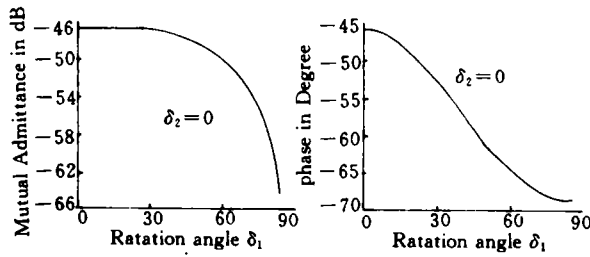


图1 互耦随扭转角的变化

表2 E-面 ($\alpha=0$) 互导纳, 三种方法计算结果的比较 (幅度: dB, 相位: 度)

Z (λ)	Modal		DIM		SRP		MSRP	
	幅度	相位	幅度	相位	幅度	相位	幅度	相位
0.38	-7.27	-72	-7.77	-69.86	-6.12	-74.93	7.90	-69.82
6.10	-26.95	33	-28.76	46.21	-28.71	46.98	-28.79	46.20
30.50			-41.30	-96.96	-41.26	-96.70	-41.30	-96.97

表3 H-面 ($z=0$) 互导纳, 三种方法计算结果的比较 (幅度: dB, 相位: 度)

α ($^{\circ}$)	Modal		DIM		SRP		MSRP	
	幅度	相位	幅度	相位	幅度	相位	幅度	相位
30	-25.98	-77	-26.02	-75.92	-26.57	-138.97	-25.69	-74.25
50	-40.96	58	-41.21	60.29	-41.32	14.32	41.13	60.99
70			-51.96	-154.30	-51.68	166.74	-51.66	-153.81

4 结 论

本文在直接积分法和表面辐射图法的基础上,提出了分析共形阵互耦的修正表面辐射图的新方法。计算结果表明,MSRP法优于直接积分法和表面辐射图法,为进一步分析旋转抛物面共形阵打下了基础。

参 考 文 献

- 1 Rudge A. W. The Handbook of Antenna Design. Chapter 9, London, 1983
- 2 Lee S. W. Mutual Admittance of Slots on a Cone; Solution by Ray Technology. IEEE Trans. AP-26, NO. 6, Nov. 1978; 768~773
- 3 Pathak P. H. Wang N. Ray Analysis of Mutual Coupling between Antennas on a Convex Surface. IEEE Trans. AP-29, Nov. 1981; 609~621
- 4 Harrington R. F. Time Harmonic Electromagnetic Fields. New York: McGrawHill. 1961
- 5 Richmond J. H. A reaction theorem and its application to antenna impedance calculations. IRE Trans. AP-9, Nov. 1961; 515~520
- 6 Wills R. W. Mutual coupling and far field radiation from waveguide antenna elements on conformal surfaces. International Conference on Radar, Paris, May 1989; 515~519

(责任编辑 潘 生)