

加载测向天线阵列的统一网络模型研究

刘海霞 李 龙*

(西安电子科技大学信息处理研究所 西安 710071)

*(西安电子科技大学工程学院 西安 710071)

摘 要: 该文首先建立联系天线阵元和加载网络的统一网络模型,把路与场统一于广义矩阵型欧姆定律之中。基于统一网络模型理论,采用矩量法(MoM)分析了加载匹配补偿网络的五元圆形测向天线阵列(FCADF)。研究表明,电路网络的加载,引入了新的路与场相互作用,可有效补偿天线单元之间的互耦影响,改善方向图不圆度特性,并实现阻抗匹配,从而提高了测向精度。此外,测向天线阵列中的局域谐振现象,通过加载网络也被有效抑制。

关键词: 统一网络模型, 测向天线阵列, 匹配补偿网络, 加载

中图分类号: TN975 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)03-0441-04

The Unified Network Model Analysis of the Loaded Antenna Array for Direction Finding

Liu Hai-xia Li Long*

(Institute of Signal and Data Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

*(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract This paper first presents the unified network model associated antennas with loaded networks, which shows that the loaded circuit networks and the antennas (field networks) are unified by the generalized matrix Ohm's law. Based on the theory of the unified network model, this paper give a rigorous study of the Five-element Circle Array for Direction Finding (FCADF) by using the Method of Moments (MoM). The results show that the interaction between circuits and fields is introduced by loading a matching and compensating network, which compensates the effect of mutual coupling between array elements, realizes impedance matching, and improves the non-circular degree of radiated pattern and the precision of direction finding. In addition, the local resonant phenomenon in FCAFD is effectively restrained by loading the circuit network.

Key words Unified network model, FCADF, Matching and compensating network, Loaded

1 引言

测向技术在通信和电子对抗中有着重要的地位,及时而准确地对辐射源定位一直是人们积极研究的课题。五基线干涉测向天线阵是一种新的干涉仪测向天线^[1],该天线阵提高了测向精度,消除了由于基线加长带来的相位模糊问题。但是,在干涉仪测向中,天线单元的增多,将引入更为复杂的互耦影响,引起相位扩展和局域强场谐振现象,这些因素又将降低测向精度^[2, 3]。因此,五基线干涉仪测向天线阵的实现要求天线单元之间进行很好的去耦,且阵单元方向图不圆度很小,在工作频段内具有足够的转换效率和相位一致性。本文提出采用加载电路网络的思想来补偿天线阵元之间的耦合,这将引入新的路与场相互作用。通过建立联系天线阵元和加载网络的统一网络模型,我们可把路与场统一于广义

矩阵型欧姆定律之中,并有效地分析网络加载前后测向天线阵列的特性。

2 统一网络模型

天线系统是一个复杂的多端口网络,一般情况下,天线系统中都含有馈电网络、负载网络和加载网络等。这是一个路问题与场问题相结合的复杂网络系统。设天线系统中有 N 个天线,每个天线单元具有 M 端口,在某些端口处加载路网络 Z_s ,则整个天线系统可视为一个 $N \times M$ 端口的广义网络,由广义矩阵型欧姆(Ohm)定律^[4],有

$$\mathbf{Z}\mathbf{I} = \mathbf{V} - \mathbf{Z}_s\mathbf{I} = \mathbf{V}_e \quad (1)$$

式中 $\mathbf{Z}$ 表示天线导体、媒质和空间的固有特性,与激励无关,称为广义阻抗矩阵; $\mathbf{Z}_s$ 为内阻加载矩阵,一般意义上, $\mathbf{Z}_s$ 可

以是非对角型的,也就是说,路内部的激励点和加载点允许耦合; V 是广义激励电压矩阵, I 是广义等效电流矩阵, V_e 表示广义等效端口电压矩阵。

当 $Z_s = 0$ 时,问题退化为理想激励源模型, $V_e = V$,即Harrington模型^[4]。如图1所示,激励 V 和内阻 Z_s 表示一般路问题, Z 则反应场问题,中间联系的电流 I 给出普遍情况下场问题与路问题的统一。如果把激励电压为零的单元看作天线的加载段;而把 Z_s 为零的单元看作理想源,那么广义矩阵型 Ohm 定律就把各种激励和加载情况统一起来。因此,对任意复杂天线系统都可以采用广义矩阵型 Ohm 定律描述的统一网络模型,把错综复杂的激励网络、加载网络和负载网络从路问题转移到场问题,两者是统一的。

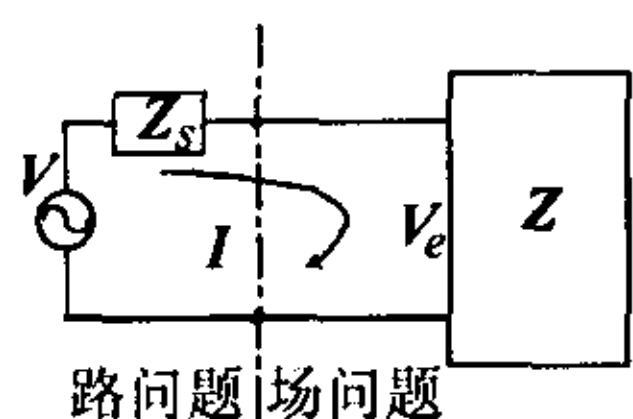


图1 广义矩阵型 Ohm 定律

3 加载五元测向天线阵列的 MoM 分析

3.1 五元测向天线阵的 MoM 分析

本文所分析的五元测向天线阵的结构如图2所示。

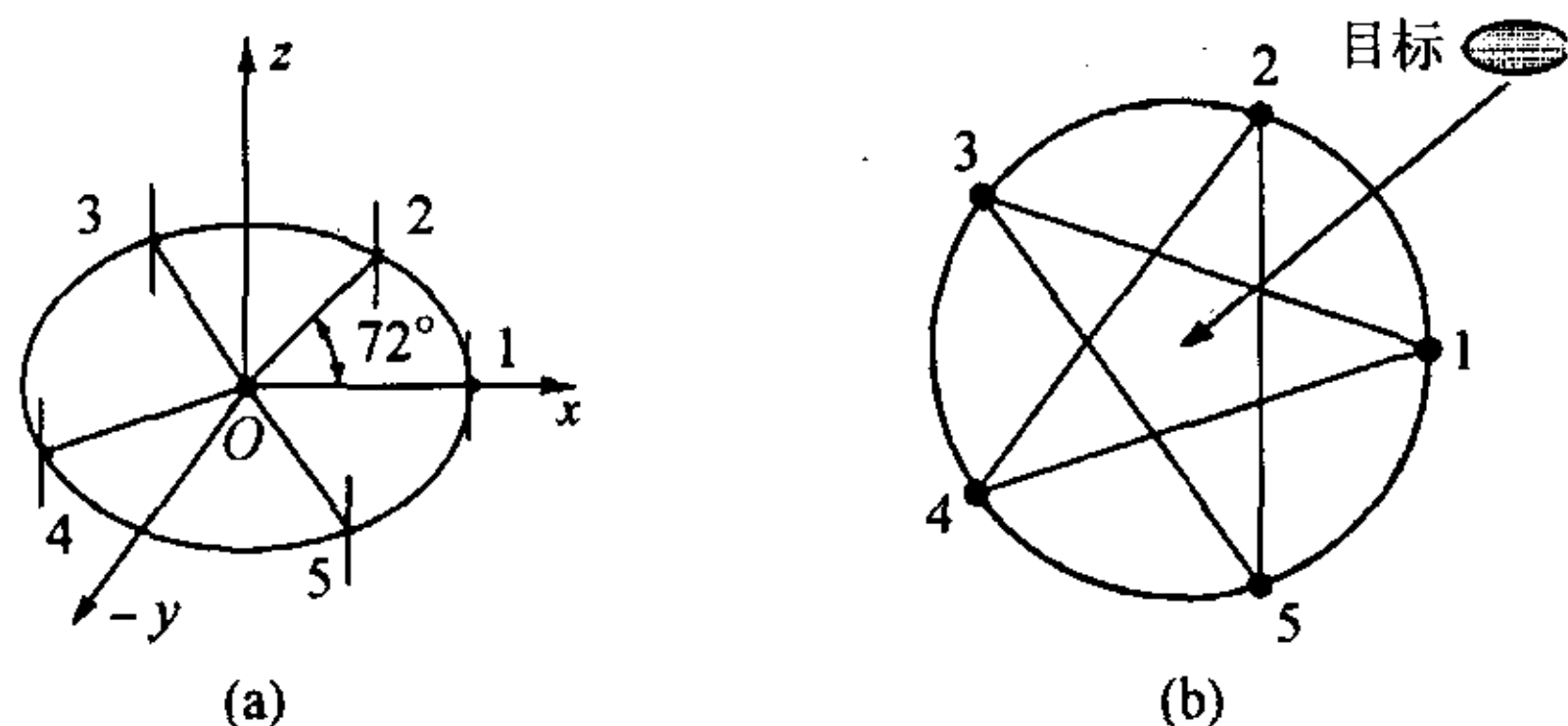


图2 五元测向天线阵的结构图

五个天线单元均是平行于 z 轴的对称振子,围绕半径为1.2m的圆周上作等间隔排列,振子馈电中心在圆周上,振子长度为2.0m,振子半径为0.015m,组成一个圆形阵。工作频段为 $f = 30\text{MHz} \sim 160\text{MHz}$ 。该阵利用互呈五角星关系的五个振子天线接收目标的相位差信息来确定目标的方向。对于图2所示的原始五元测向天线阵,阵中单元之间的耦合影响比较大,水平面单元方向图在频带中畸变程度很严重,方向图不圆度(水平面最大方向与最小方向增益差)达到25dB左右。另外,该天线阵的驻波特性也不好,特别在工作频带低端,驻波比达到500以上,在某些单元附近还出现强场谐振现象^[5,6],这样的性能是不能正常工作的。面对五元测向天线阵初始结构存在的上述严重问题,如果采用增大天线单元之间的间距来改善互耦影响,则会由于基线加长带来相位模糊问题。因此,我们从加载匹配补偿网络角度来考虑,即在各天线单元上均端接一个匹配补偿网络,通过优化网络的拓

扑结构和元件参数值,可有效地改变天线上电流的振幅和相位,在所讨论的工作频段内,达到很好的去耦作用,并实现阻抗匹配,提高天线的灵敏度和效率。本文采用单纯形优化算法,经过优化计算给出了如图3所示的匹配补偿网络拓扑结构。

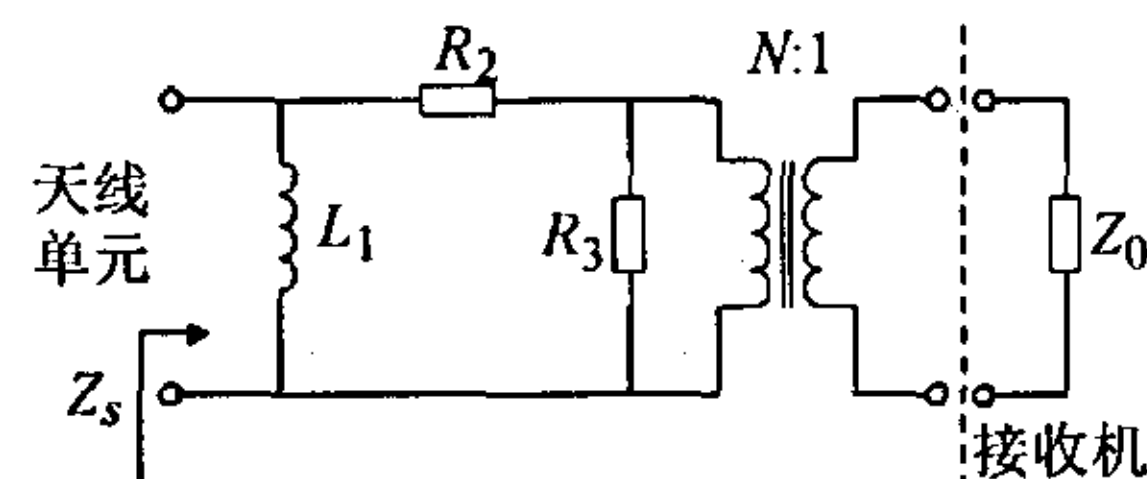


图3 匹配补偿网络拓扑图

从端口1看进去的输入阻抗作为加载阻抗 Z_s 。加载区内的电磁场具有极为复杂的性质,企图用一个准确的数学模型来描述加载区中的电流、电场强度、磁场强度之间的关系是困难的。在加载区的长度比天线本身长度小得多的条件下,可以用狄拉克 δ 函数来代替加载区及其领域中加载阻抗的分布规律,即在第 i 个加载区附近有 $Z(z) = Z_s \delta(z - z_i)$ 。基于统一网络模型理论,我们可建立扩展边界条件方程^[7]为

$$E_{iz} = j\omega\mu \int_z I(z) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz - \frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{\partial}{\partial l} \int_z \frac{\partial I(z)}{\partial l} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz + Z_s I(z_i) \delta(z - z_i) \quad (2)$$

应用 MoM 法^[4],展开天线电流为下列形式:

$$I = \sum_{i=1}^5 \sum_{n=1}^N I_{i,n} P_{i,n} \hat{\Delta}_{i,n} \quad (3)$$

式中 $i=1,2,3,4,5$ 表示5个天线单元的编号, $n=1,2,\dots,N(i)$, $N(i)$ 为第 i 根天线上展开函数的个数; $I_{i,n}$ 是未知电流的展开系数; $\hat{\Delta}_{i,n}$ 是第 i 个天线单元上第 n 段导线轴向单位矢量, $P_{i,n}$ 为分域脉冲函数,即

$$P_{i,n}(z) = \begin{cases} 1, & z \text{ 在 } \Delta_{i,n} \text{ 内} \\ 0, & z \text{ 在 } \Delta_{i,n} \text{ 外} \end{cases} \quad (4)$$

选择权函数 $w_{j,m}$ 为狄拉克函数 $\delta(l - l_{j,m})$ 并定义内积,可得

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{n=1}^N I_{i,n} \langle w_{j,m}, LP_{i,n} \rangle = \langle w_{j,m}, E_i^{\text{inc}} \rangle \quad (5)$$

式中 L 表示式(2)决定的算子方程, E_i^{inc} 表示激励电场, (j,m) 的意义与 (i,n) 相同。因此,我们可得到广义网络矩阵方程为

$$(Z + Z_s)I = V \quad \text{或} \quad I = (Z + Z_s)^{-1}V \quad (6)$$

可见,通过改变加载匹配补偿网络,即改变等效加载阻抗,从而改变天线的电流分布(幅度和相位),进而改变天线单元的输入阻抗和方向图等特性,此即路与场相互作用的统一。

3.2 匹配补偿网络的转换功率损耗

匹配补偿网络的转换功率损耗是保证天线增益和灵敏度要求的一个重要指标。在补偿互耦影响和实现阻抗匹配的

同时, 要求网络的转换功率损耗尽量小。对任意的二端口网络, 其网络的转换功率损耗^[8]可定义为: 信号源的资用功率 P_0 与供给负载的吸收功率 P_L 之比, 用分贝表示, 即

$$L_T = 10 \lg \frac{P_0}{P_L} = 10 \lg \frac{|(1 - S_{11}\Gamma_{g1})(1 - S_{22}\Gamma_{L2}) - S_{12}S_{21}\Gamma_{g1}\Gamma_{L2}|^2}{|S_{21}|^2(1 - |\Gamma_{g1}|^2)(1 - |\Gamma_{L2}|^2)} \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

式中 $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ 为该网络的等效散射参数, Γ_{L2} 是负载(天线)反射系数, Γ_{g1} 为源端反射系数, 一般情况下, $\Gamma_{g1} = 0$ 。

4 数值结果

本文对 1 号天线单元中心馈单位电压源, 其他单元作为无源振子, 且各单元终端均加载如图 3 所示的匹配补偿网络, 其中参数设置为: $L_1 = 4.2 \mu\text{H}$, $R_2 = 150 \Omega$, $R_3 = 1350 \Omega$, $N = 3$ 。互耦效应不仅使阵单元的输入阻抗, 还使阵单元的辐射方向图不同于孤立单元。下面的计算结果分别给出了加载网络前后测向天线阵列的特性变化。

从网络加载前后天线阵各单元上的电流分布图 4 来看, 加载匹配补偿网络后, 无源天线单元上感应的场相对减弱很多, 这表明互耦效应减弱了, 这正是加载网络的本质所在。互导纳特性可直接反映互耦作用的强弱, 根据阵结构的对称性, 有 $Y_{12} = Y_{15}$, $Y_{13} = Y_{14}$, 从图 5 和图 6 可见, 网络加载后互导纳的实部和虚部在整个工作频带内都明显减小, 这也表明天线单元之间的相互作用减弱了。在阵列天线中, 还会出现一种局域的强场尖峰现象, 即当天线工作在某个频率时,

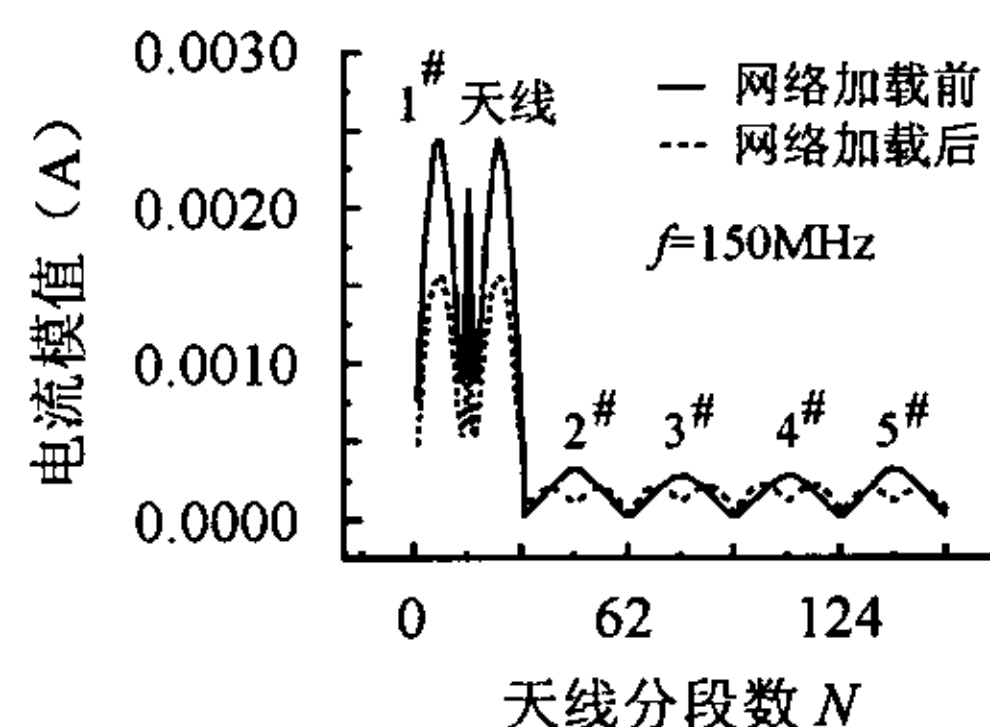


图4 网络加载前后天线各单元的电流模值比较

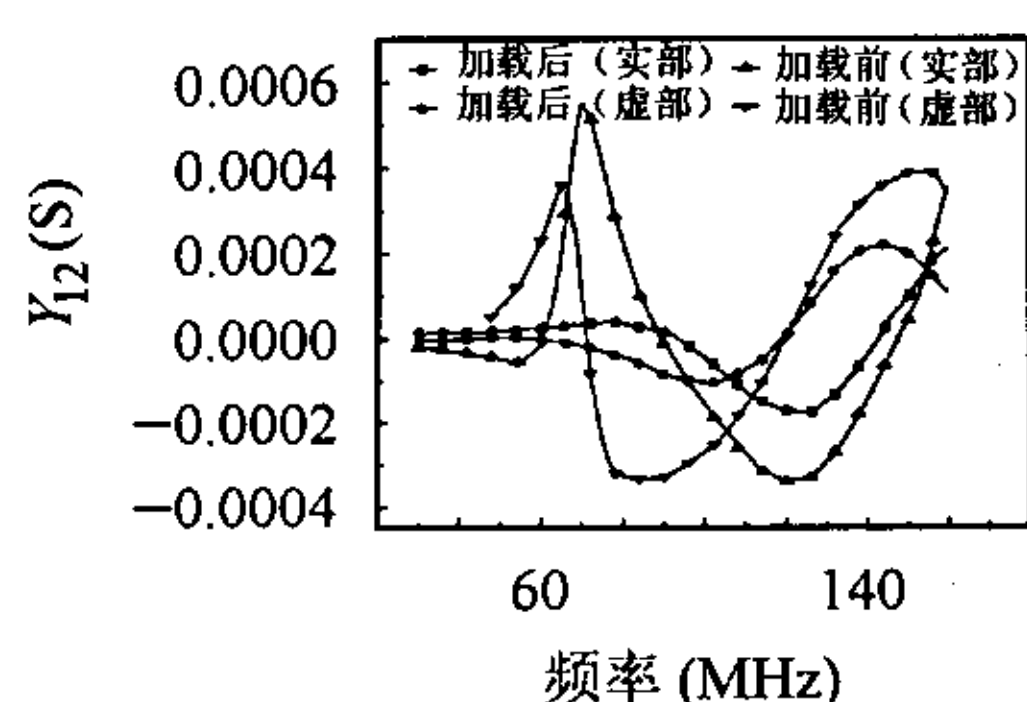


图5 网络加载前后互导纳 Y_{12} 频带特性

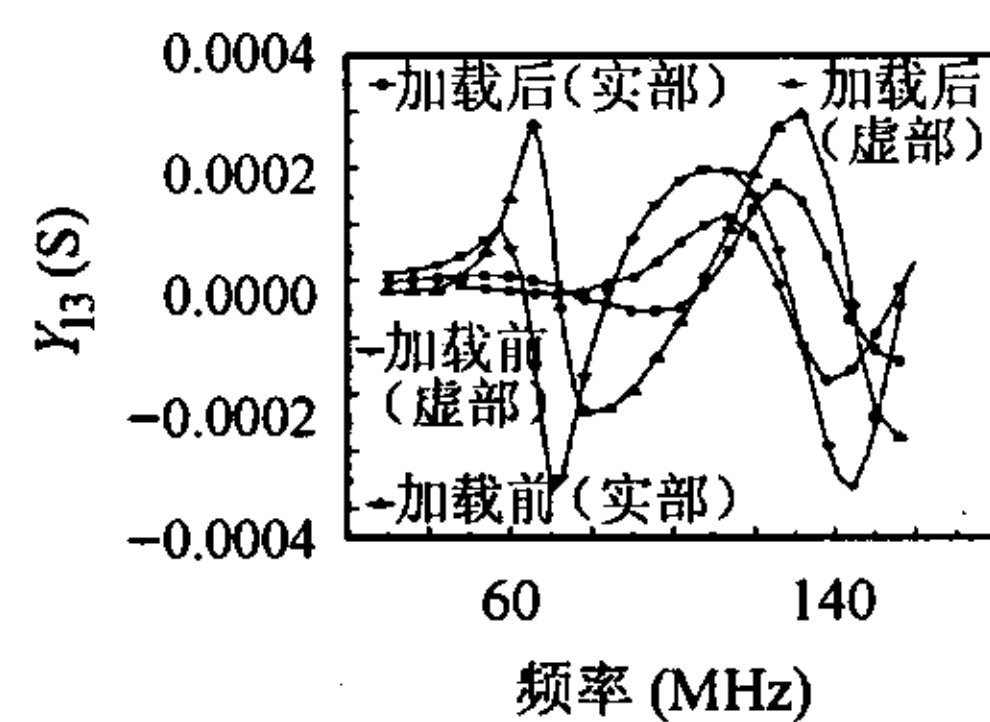


图6 网络加载前后互导纳 Y_{13} 频带特性

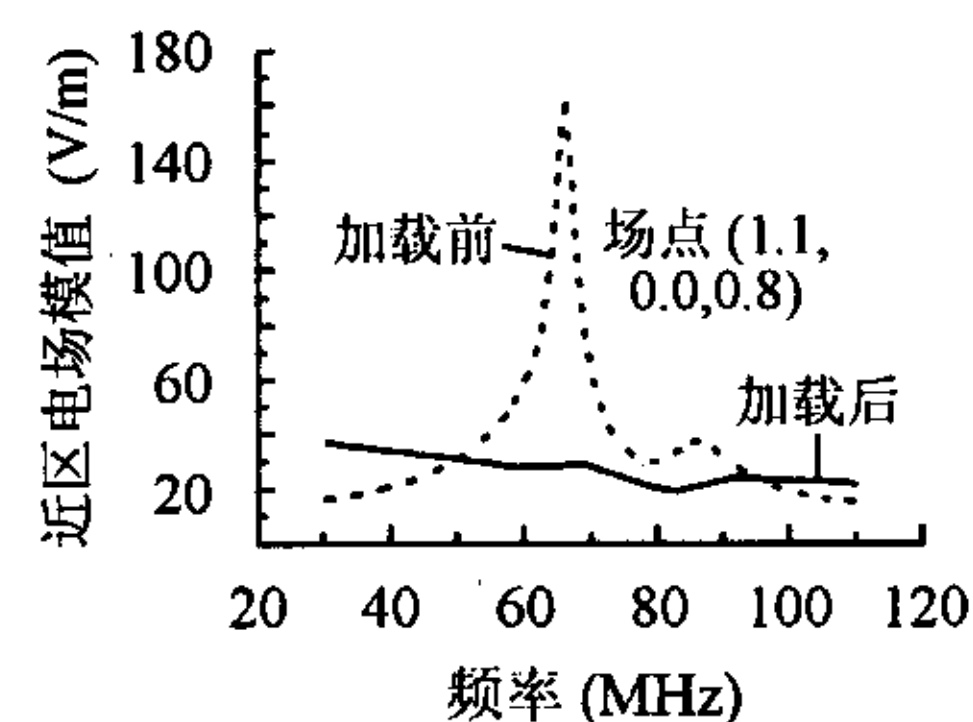


图7 近场局域谐振现象抑制

在局部空间的一些点和方位上会出现强场现象, 这会对测向造成强烈的扰动。针对这一电磁兼容中迫切需要解决的局域谐振现象^[6], 本文通过加载网络, 也可有效抑制其谐振行为, 如图 7 所示。

从增益方向图特性图 8 和图 9 来看, 加载网络后, 水平面单元方向图不圆度明显改善, 在整个工作频段内, 基本满足要求, 从而保证了目标测向的精度。从驻波特性图 10 来看, 加载网络后, 在全工作频段内, 输入端驻波比 VSWR 均满足性能要求, 可见, 该补偿网络同时也是一个匹配网络。但是, 匹配补偿网络的加载会带来转换功率损耗, 降低天线增益, 这是矛盾的对立面, 如图 11 所示。因此, 必须寻找两者最佳的结合点, 才能使测向天线阵的性能达到最佳。

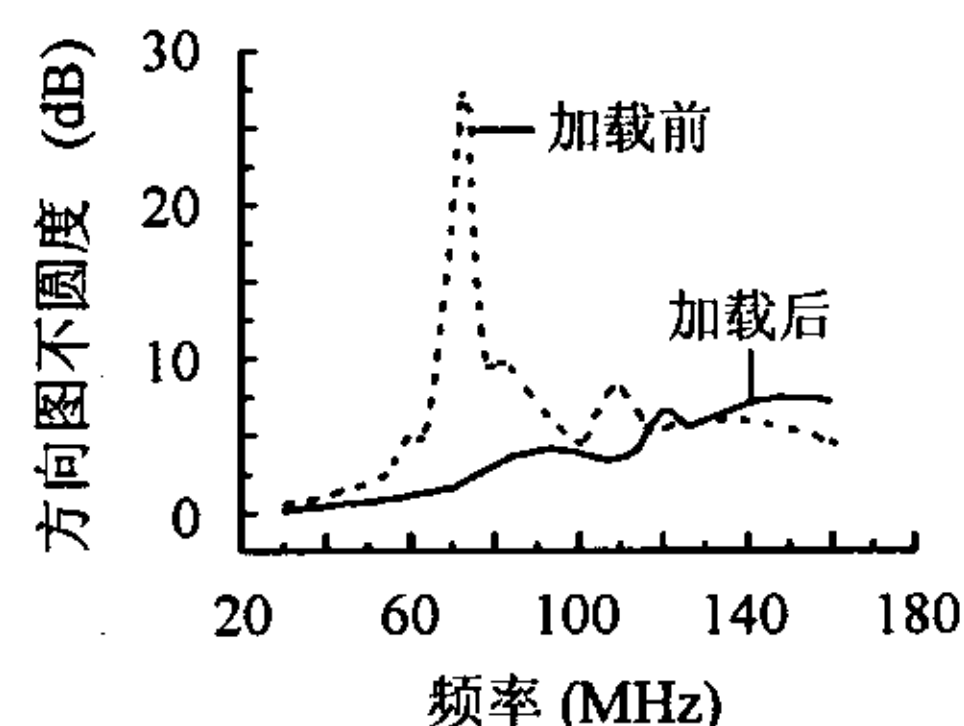


图8 网络加载前后方向图不圆度频带特性

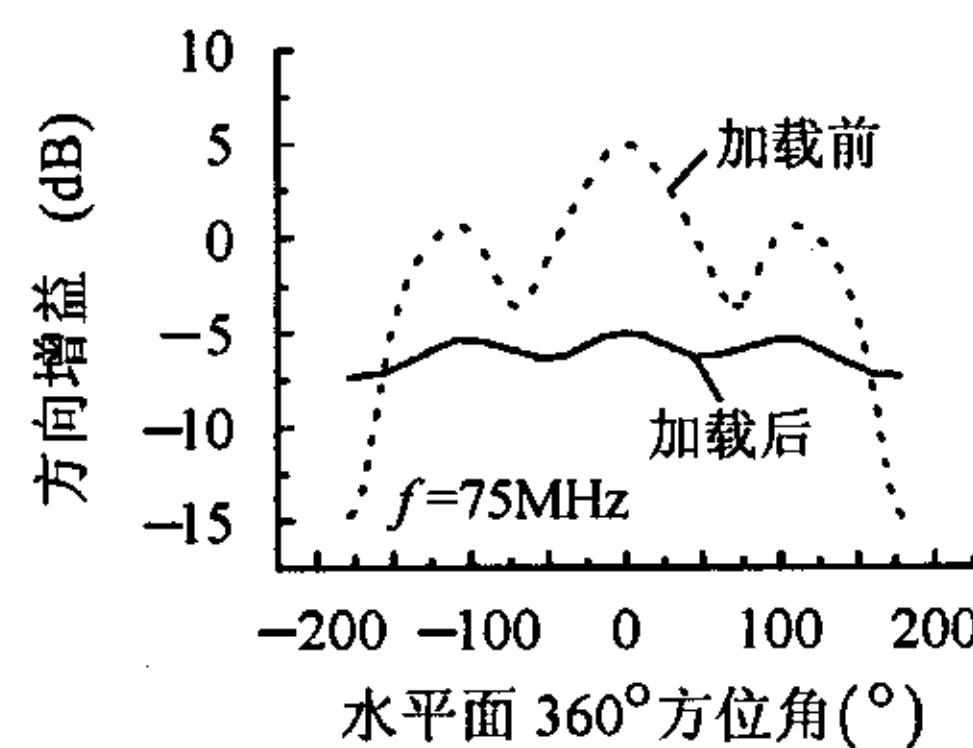


图9 网络加载前后水平面增益方向图

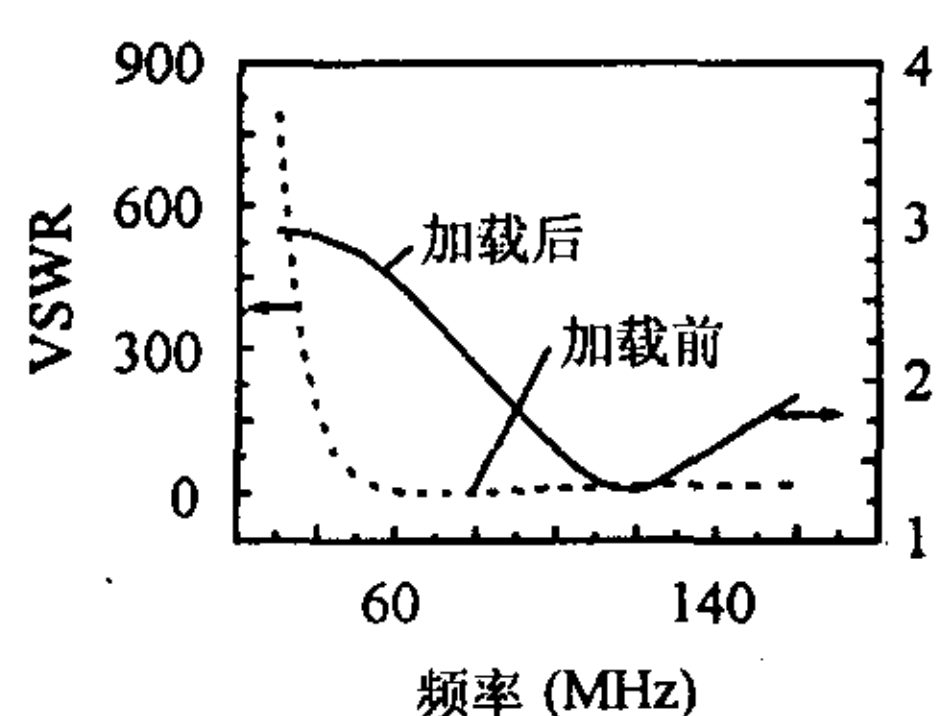


图10 网络加载前后驻波比频带特性

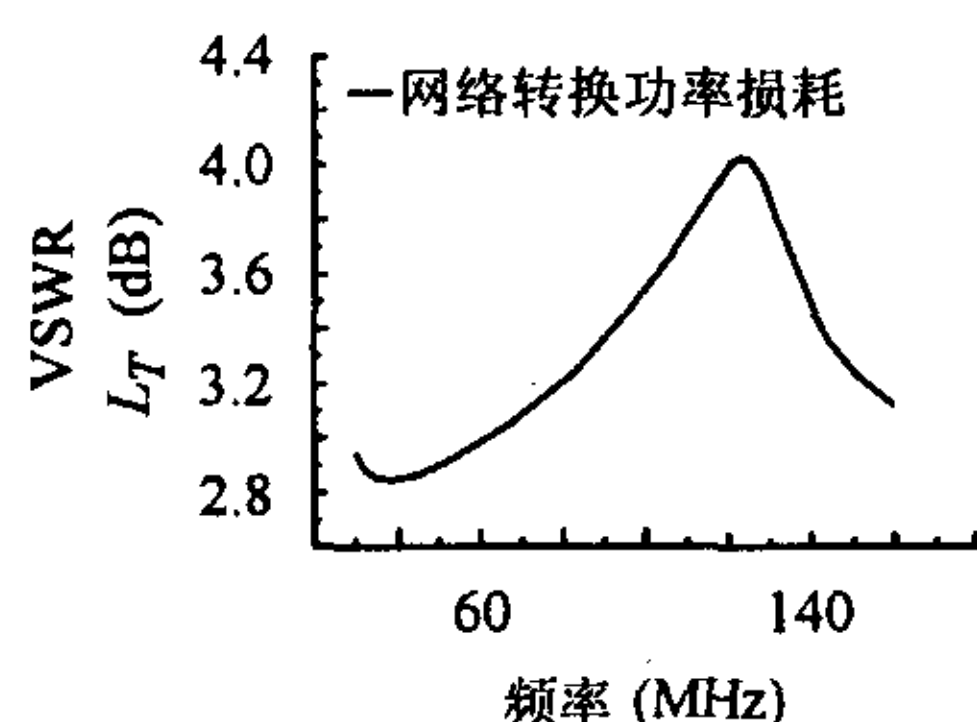


图11 网络转换功率损耗频带特性

5 结论

本文基于统一网络模型理论,对网络加载的五元圆形测向天线阵列进行了仔细研究。通过加载匹配补偿网络,有效地改善了五元测向天线阵的性能。网络的加载,引入了新的路与场相互作用,从而削弱了单元之间互耦的影响,补偿了由于互耦影响而产生的相位扩展,使水平面单元增益方向图趋近于圆,方向图不圆度大大降低,从而提高了测向精度;此外,网络的加载,也很好改善了天线的阻抗特性,进而提高了天线的灵敏度和效率。对于复杂电磁环境中出现的谐振现象,本文的工作也提出了一种改善措施,即通过加载网络来抑制其谐振行为,这一点对电磁兼容的分析和设计是非常有意义的。值得指出,网络的拓扑结构还可以进一步优化或采用有源网络,可使测向天线阵列的性能达到最佳。

参考文献

- [1] 鲁道夫格拉鲍编,平良子译.无线电测向技术.成都:西南电子电信技术研究所,1993,第二章.
- [2] Friedlander B, Weiss A J. Direction finding in the presence of mutual coupling. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1991, 39(3), 273 – 284.
- [3] Hui H T. Improved compensation for the mutual coupling effect in a dipole array for direction finding. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 2003, 51(9): 2498 – 2503.
- [4] Harrington R F. Field Computation by Moment Method, New York: IEEE Press, 1993, ch.5.
- [5] Li Long, Liang Changhong. Study of generalized resonance in antenna system, Proc. of 2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing, May 21 – 24, 2002: 162 – 165.
- [6] 金谋平.多导体散射中的广义谐振研究.[博士学位],西安:西安电子科技大学,2000.
- [7] 刘其中,宫德明.天线的计算机辅助设计.西安:西安电子科技大学出版社,1988,第三章.
- [8] 吴万春,梁昌洪.微波网络及其应用.西安:西北电讯工程学院出版社,1978,第三章.

刘海霞: 女,1976年生,硕士,讲师,研究方向:信号处理、时间频率的控制和测量.

李 龙: 男,1977年生,博士生,研究方向:电磁场数值计算、电磁兼容、缝隙天线.