

# 一种考虑互耦计算大型阵列天线辐射和 散射场的新方法

张 帅, 龚书喜, 姜 文

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 为了解决考虑互耦情况下大型阵列天线的辐射和散射场的计算难题, 提出一种基于有源单元方向图法结合小阵外推大阵思想的新方法. 不同于以往先逐个计算阵列环境中各个单元的辐射和散射场, 再利用叠加原理来求得阵列总场的传统意义下的有源单元方向图法. 文中通过公式推导, 简化了该方法的操作过程, 将大型阵列的计算问题转化为两个小型阵列的总场计算问题, 不仅大大地减小了计算量, 而且避免了逐个计算单元场而带来的操作复杂度. 计算结果与商用仿真软件 HFSS 的仿真结果基本一致, 验证了方法的正确性.

**关键词:** 阵列天线; 辐射; 散射; 有源单元方向图

**中图分类号:** O441 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-2142-06

## A Novel Method for Calculating the Radiation and Scattering Patterns of Large Finite Arrays Including Mutual Coupling Effects

ZHANG Shuai, GONG Shu-xi, JIANG Wen

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

**Abstract:** This paper proposes a novel method for calculating the radiation and scattering patterns of large arrays. Approximate expressions of the proposed method are derived based on the active element pattern technique and the principle of superposition. With the expressions, the large array analysis problems are converted into two simplified small array problems and the computational cost is considerably reduced. In addition, the effects of the mutual coupling and the surrounding array environment are rigorously accounted for. Example arrays of microstrip patch antennas are analyzed to assess the proposed method. A good agreement between the results calculated by the proposed method and the ones simulated by HFSS validates the accuracy of the proposed method.

**Key words:** antenna arrays; radiation; scattering; active element pattern

### 1 引言

阵列天线的辐射和散射的分析和计算是天线领域的一类重要课题. 当阵列无限大时, 可假设在阵列环境中各单元的辐射和散射场相同, 利用经典的方向图乘法来近似计算阵列的辐射<sup>[1,2]</sup>和散射场<sup>[3,4]</sup>. 但是, 当阵列规模较小时, 由于单元间互耦的影响, 阵列中各单元的辐射和散射场均存在一定的差异, 使经典法失效<sup>[3]</sup>. 由于阵列天线造价昂贵, 更准确的特性预估意味着更小的设计风险和成本浪费, 因此, 需要精确分析和计算其辐射和散射特性. 传统的做法是借助矩量法、时域有限差分法<sup>[5]</sup>、有限元法等数值算法或者基于这些算法的商用软件. 然而, 当阵列规模较大时, 受限于当前的计算机能力, 运用这些方法将要耗费很长的时间, 甚至无法计

算. 从而导致较大规模阵列天线的辐射和散射的精确计算成为了天线领域的一大难题.

为解决大型阵列辐射场的计算难题, Pozar 在文献 [6] 中介绍了一种称为有源单元方向图法 (active element pattern method) 的精确计算方法. 在该文献中, 将有源单元方向图定义为在阵列环境下, 该单元单独激励、其它单元端口接相同负载时的辐射方向图. 其实现步骤为: 首先, 逐个计算各个单元的有源单元方向图; 接着, 利用叠加定理将所有单元的有源单元方向图叠加来得到阵列的总辐射场. 在 Kelly<sup>[7]</sup> 和 Toh<sup>[8]</sup> 的工作中, 通过对比阵列中各个单元的有源单元方向图发现, 当阵列足够大时, 中间单元的有源单元方向图基本一致. 基于此现象, 可进一步研究找出中间单元的有源单元方向图不再变化的小型阵列的规模. 进而, 利用小阵外推大阵的思想,

运用该小型阵列中各个单元的有源单元方向图来等效更大规模的阵列中相似环境下的天线单元的有源单元方向图,进而等效出大规模阵列中每个单元的有源单元方向图,最后利用叠加定理来计算大规模阵列的辐射场.该方法将大型阵列天线的辐射计算问题转化为小规模阵列中各个单元的有源单元方向图的计算问题,不仅有效地降低了计算量,而且精确地考虑了互耦的影响,在工程实践中具有很大的应用价值.例如,以往有学者运用优化算法与数值算法相结合来进行天线设计<sup>[9~11]</sup>,但受限于 PC 的计算能力,将需要大量的时间,而且无法实现较大规模阵列天线的辐射特性优化.而在文献[12]中,He 将该方法与泰勒综合法相结合,设计了一个较大规模低副瓣微带贴片阵列天线,不仅精确考虑了互耦的影响,而且节省了大量的时间.

然而,以往关于有源单元方向图法的研究和应用往往集中于阵列的辐射特性,对于其在大型阵列散射场计算方面的应用和研究很少见报道.其原因如下:对于辐射情况,其有源单元方向图可以运用数值算法或者仿真软件来计算和提取,但是对于散射情况,仿真软件无法提取入射波照射情况下,阵列环境中单个单元的散射场.为得到阵列环境中单个单元的散射场,需要熟练掌握数值算法,才能使得基于小阵外推大阵思想的大型阵列散射计算得以实现.而且,逐个提取阵列环境下每个单元的辐射和散射场也是一个十分繁琐和耗时过程.为了解决以上两个难题,文中通过公式推导,改进了传统的有源单元方向图法.将大型阵列天线的辐射和散射场的计算问题简化为两个小型阵列的总场计算问题,不仅避免了逐元提取有源单元方向图带来的操作复杂度,而且解决了运用仿真软件无法外推计算大型阵列天线散射场的难题.

文中运用该方法计算了 16 元微带贴片天线组成的直线阵的辐射和散射方向图,并与运用 HFSS 的仿真结果和方向图乘积法的计算结果进行比较,发现文中方法计算结果与仿真结果基本一致,而方向图乘积法则存在较大误差.说明了,对于有限规模阵列来讲,方向图乘积法并不能用来准确预估其方向图,而文中方法却能很精确地考虑单元间的互耦影响,其计算结果更接近于真实情况.而且其可以用来计算任意形式的单元组成的阵列的辐射和散射方向图,对于工程实践中大型阵列天线辐射和散射的准确预估具有很强的应用价值和指导意义.

## 2 方法介绍

### 2.1 阵列辐射和散射场的方向图乘积法

图 1 所示为一沿  $x$  轴排列的  $N$  元均匀直线阵,由于文中方法适用于任何形式天线单元组成的直线阵,

故这里用离散的黑点来代表具体的天线单元.其远区辐射场可表示为各个单元的有源单元方向图的叠加<sup>[6~8]</sup>:

$$\mathbf{E}_N^r(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i^r(\theta, \phi) \quad (1)$$

其中,上标  $r$  代表辐射场(radiation field), $\mathbf{E}_i^r(\theta, \phi)$  代表第  $i$  个单元的有源单元方向图.已经验证<sup>[7,8,12]</sup>,用上述有源单元方向图法算得的阵列总场完全考虑了单元间互耦的影响.

当阵列无限大时,可利用方向图乘积法<sup>[1,2]</sup>,认为所有单元的有源单元方向图相同,并用孤立环境中的单个天线单元的辐射场  $\mathbf{E}_e^r(\theta, \phi)$  来代替阵列环境下的每个单元的有源单元方向图,将阵列的远区辐射总场近似为:

$$\mathbf{E}_N^r(\theta, \phi) = \mathbf{E}_e^r(\theta, \phi) \sum_{i=1}^N \exp[jk(i-1)d_0 \sin\theta \cos\phi] \quad (2)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数, $\lambda$  为天线工作频率对应的自由空间内的波长, $d_0$  为相邻单元间的间距.

类似于辐射方向图乘积定理,笔者在文献[3,4]中推导出阵列的远区散射场也可以表示为单元散射场与散射阵列因子的乘积:

$$\mathbf{E}_N^s(\theta, \phi) = \mathbf{E}_e^s(\theta, \phi) \sum_{i=1}^N \exp[j2k(i-1)d_0 \sin\theta \cos\phi] \quad (3)$$

其中,上标  $s$  代表散射场(scattered field), $\mathbf{E}_e^s(\theta, \phi)$  代表孤立环境中单个天线单元的远区散射场.

显然,由于互耦的影响,阵列环境中各单元的辐射和散射场并不尽相同,因此,式(2)和式(3)中的辐射和散射总场计算并没有完全考虑单元间的耦合,与真实情况下的场仍存在一定的误差.

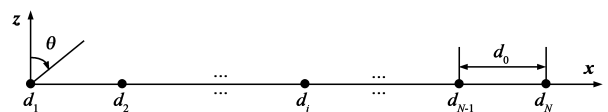


图1  $N$ 元均匀直线阵的几何结构图

### 2.2 有源单元方向图法在散射中的应用

文中将有源单元方向图法推广至阵列散射场的计算,并将散射情况的有源单元方向图定义为:在入射波照射情况下,阵列环境中的某个指定单元的散射场.为了与辐射情况相区分,这里将其称为有源单元散射方向图.从而,阵列的总散射场可以表示为所有单元的有源单元散射方向图的叠加:

$$\mathbf{E}_N^s(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i^s(\theta, \phi) \quad (4)$$

其中  $\mathbf{E}_i^s(\theta, \phi)$  为第  $i$  个单元有源单元散射方向图.

### 2.3 基于有源单元方向图法结合小阵外推大阵思想来计算大型阵列辐射和散射场的方法

由于以往有源单元方向图法在大型阵列天线散射

场计算方面的应用很少见报道,本节着重介绍其在散射场计算上的应用.其计算公式可以很轻易地进行修改而用于大型阵列辐射场的计算.

### 2.3.1 散射场的计算

关于单元间的互耦效应,文献[13]和[14]的研究表明,对于一个单元而言,只有其邻近的几个单元会对其辐射方向图产生较大影响,而离其较远的单元对其的作用可以忽略.笔者的研究发现,该现象在散射情况中同样存在.从而,假设一个  $M$  元的小型阵列的中心单元的有源单元方向图已经足够近似于更大规模阵列的中间单元的有源单元方向图,那么可以用该  $M$  元阵列各单元的有源单元散射方向图来等效更大规模的阵列中相似环境下的单元的有源单元散射方向图.

这里将小型阵的总散射场表示为中心单元的散射场  $\mathbf{E}_m^s$  和左边缘单元的散射场  $\mathbf{E}_l^s$  与右边缘单元的散射场  $\mathbf{E}_r^s$  的叠加:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_M^s(\theta, \phi) &= \sum_{i=1}^M \mathbf{E}_i^s(\theta, \phi) = \mathbf{E}_l^s + \mathbf{E}_m^s + \mathbf{E}_r^s \\ &= \sum_{i=1}^{(M+1)/2-1} \mathbf{E}_i^s(\theta, \phi) + \mathbf{E}_{(M+1)/2}^s(\theta, \phi) \\ &\quad + \sum_{i=(M+1)/2+1}^M \mathbf{E}_i^s(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (5)$$

这里将  $\mathbf{E}_m^s$  定义为  $M$  元小型阵的中心单元的有源单元方向图  $\mathbf{E}_{(M+1)/2}^s(\theta, \phi)$ , 将  $\mathbf{E}_l^s$  和  $\mathbf{E}_r^s$  分别定义为  $M$  元小型阵的左边缘和右边缘单元的有源单元方向图的叠加

$$\sum_{i=1}^{(M+1)/2-1} \mathbf{E}_i^s(\theta, \phi) \text{ 和 } \sum_{i=(M+1)/2+1}^M \mathbf{E}_i^s(\theta, \phi).$$

那么,可以利用小阵外推大阵的思想,将大型阵列的所有中间单元的有源单元方向图近似等效为此  $M$  元小型阵列的中心单元的有源单元方向图  $\mathbf{E}_m^s$ , 将其左边缘和右边缘单元的场贡献分别等效为  $M$  元小型阵对应位置的场贡献  $\mathbf{E}_l^s$  和  $\mathbf{E}_r^s$ . 考虑到如式(3)所示的空间相位差, 可将  $N$  元大型阵列的远区散射场表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_N^s(\theta, \phi) &= \mathbf{E}_l^s + \mathbf{E}_m^s \cdot \sum_{i=1}^{N-M+1} \exp[j2k(i-1)d_0 \sin\theta \cos\phi] \\ &\quad + \mathbf{E}_r^s \cdot \exp[j2k(N-M)d_0 \sin\theta \cos\phi] \end{aligned} \quad (6)$$

利用式(6), 可以将  $N$  元大型阵列的散射场计算问题转化为  $M$  元小型阵列的计算问题, 从而大大地减小了计算量, 解决了考虑互耦情况下大型阵列天线散射场的计算难题.

### 2.3.2 辐射场的计算

基于式(1)和(2), 以及以上散射场的计算方法, 可以通过修改式(6)而很轻易地得出式(7), 从而将  $N$  元大型阵列的辐射场计算问题转化为  $M$  元小型阵的计算问题:

$$\mathbf{E}_N^r(\theta, \phi) = \mathbf{E}_l^r + \mathbf{E}_m^r \sum_{i=1}^{N-M+1} \exp[jk(i-1)d_0 \sin\theta \cos\phi]$$

$$+ \mathbf{E}_r^r \cdot \exp[jk(N-M)d_0 \sin\theta \cos\phi] \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{E}_m^r$  为  $M$  元小型阵列的中心单元的有源单元方向图;  $\mathbf{E}_l^r$  和  $\mathbf{E}_r^r$  分别为  $M$  元小型阵列的左边缘单元和右边缘单元的有源单元方向图的叠加.

### 2.4 一种简化的有源单元方向图法

在 2.3 节中, 介绍了有源单元方向图法结合小阵外推大阵思想, 在大型阵列天线辐射和散射场计算中的公式, 其在实际应用中的操作流程为: 首先, 利用数值算法分别提取  $M$  元小型阵列中每个单元的有源单元辐射和散射方向图; 接着, 利用式(7)和(6), 分别计算大型阵列的辐射和散射场. 而对于没有熟练掌握数值算法的学者, 此时的解决方法为: 利用 HFSS 等仿真软件来提取  $M$  元小型阵列中每个单元的有源单元辐射和散射方向图. 但是, 在实践中发现, 利用 HFSS 可以通过改变软件的设置来计算并提取每个单元的有源单元辐射方向图, 但是其有源单元散射方向图无法提取. 其原因是: 在仿真软件中, 一旦仅采用入射波激励, 那么仿真所得的即为阵列的散射总场, 无法通过改变仿真软件的设置来计算和提取单元的散射场. 为了解决这个难题, 笔者通过公式推导, 提出了一种简化的有源单元方向图法.

#### 2.4.1 该方法在大型阵列散射场计算中的应用

基于式(6),  $M+1$  元均匀直线阵的远区散射场可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{M+1}^s(\theta, \phi) &= \mathbf{E}_l^s + \mathbf{E}_m^s \cdot [1 + \exp(j2kd_0 \sin\theta \cos\phi)] \\ &\quad + \mathbf{E}_r^s \cdot \exp[j2kd_0 \sin\theta \cos\phi] \end{aligned} \quad (8)$$

故  $M+1$  元阵和  $M$  元阵的远区散射场之差为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{M+1}^s(\theta, \phi) - \mathbf{E}_M^s(\theta, \phi) &= \mathbf{E}_m^s \cdot \exp(j2kd_0 \sin\theta \cos\phi) \\ &\quad + \mathbf{E}_r^s \cdot [\exp(j2kd_0 \sin\theta \cos\phi) - 1] \end{aligned} \quad (9)$$

同理,  $N$  元阵和  $M$  元阵的远区散射场之差为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_N^s(\theta, \phi) - \mathbf{E}_M^s(\theta, \phi) &= \mathbf{E}_m^s \cdot \{ \exp(j2kd_0 \sin\theta \cos\phi) \\ &\quad + \exp(j2 \cdot 2kd_0 \sin\theta \cos\phi) + \cdots \\ &\quad + \exp(j2 \cdot ikd_0 \sin\theta \cos\phi) + \cdots \\ &\quad + \exp[j2 \cdot (N-M)kd_0 \sin\theta \cos\phi] \} \\ &\quad + \mathbf{E}_r^s \cdot \{ \exp[j2(N-M)kd_0 \sin\theta \cos\phi] - 1 \} \end{aligned} \quad (10)$$

将式(9)代入(10)可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_N^s(\theta, \phi) - \mathbf{E}_M^s(\theta, \phi) &= [\mathbf{E}_{M+1}^s(\theta, \phi) - \mathbf{E}_M^s(\theta, \phi)] \\ &\quad \cdot \{ 1 + \exp(j2kd_0 \sin\theta \cos\phi) \\ &\quad + \exp(j2 \cdot 2kd_0 \sin\theta \cos\phi) + \cdots \\ &\quad + \exp(j2 \cdot ikd_0 \sin\theta \cos\phi) + \cdots \\ &\quad + \exp[j2 \cdot (N-M-1)kd_0 \sin\theta \cos\phi] \} \end{aligned} \quad (11)$$

从而,  $N$  元大型直线阵的远区散射场可表示为:

$$\mathbf{E}_N^s(\theta, \phi) = [\mathbf{E}_{M+1}^s(\theta, \phi) - \mathbf{E}_M^s(\theta, \phi)] \cdot \frac{1 - \exp[j2(N-M)kd_0 \sin\theta \cos\phi]}{1 - \exp[j2kd_0 \sin\theta \cos\phi]} + \mathbf{E}_M^s(\theta, \phi) \quad (12)$$

式(12)即为此简化的有源单元方向图法在大型阵列散射场计算中的应用,可见,通过该公式的推导,将  $N$  元大型阵的散射计算问题转化为一个  $M$  元小型阵和一个  $M+1$  元小型阵的散射总场计算问题. 不仅避免了使用数值算法需要逐个提取各单元的有源单元散射方向图的繁琐操作过程,节省了大量的人力和计算时间;而且很好地解决了 HFSS 等仿真软件无法提取有源单元散射方向图的难题. 在实际工作中,可以先提取两个小型阵列的散射总场,再利用式(12)来计算  $N$  元大型阵列的散射场.

### 2.4.2 该方法在大型阵列辐射场计算中的应用

在 2.4.1 节中着重介绍了该简化的有源单元方向图法在大型阵散射场计算中的应用,同理,可以很轻易地通过修改式(12)使该方法应用于大型阵列辐射场的计算. 其公式如下:

$$\mathbf{E}_N^r(\theta, \phi) = [\mathbf{E}_{M+1}^r(\theta, \phi) - \mathbf{E}_M^r(\theta, \phi)] \cdot \frac{1 - \exp[j(N-M)kd_0 \sin\theta \cos\phi]}{1 - \exp[jkd_0 \sin\theta \cos\phi]} + \mathbf{E}_M^r(\theta, \phi) \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{E}_M^r(\theta, \phi)$  和  $\mathbf{E}_{M+1}^r(\theta, \phi)$  分别为  $M$  元和  $M+1$  元小型阵列的远区辐射总场.

通过 2.4.1 和 2.4.2 节中的公式推导和分析,我们可以运用数值算法或者仿真软件来提取两个小型阵列的辐射和散射总场,进而利用式(13)和(12)来分别计算大型阵列的辐射和散射场,对工程实践中大型阵列天线的设计提供了理论指导.

## 3 方法验证

上节详细地介绍了一种简化的有源单元方向图法及其在大型阵列辐射及散射场计算中的应用,本节将以微带贴片天线组成的直线阵为例来对其正确性及效率进行验证. 天线单元的具体结构如图 2 所示,要求其中心工作频率为 10GHz. 经设计后,矩形金属贴片的尺寸为  $L = 8.7\text{mm}$ ,  $W = 8.4\text{mm}$ ;介质基片的厚度为 1mm,介电常数为 2.65.

实验发现,当  $M = 7$  时,文中方法即可获得与 HFSS 相一致的结果. 因此,本节所举实例中的文中方法的计算结果,均为采用  $M = 7$  结合式(12)和(13)计算所得.

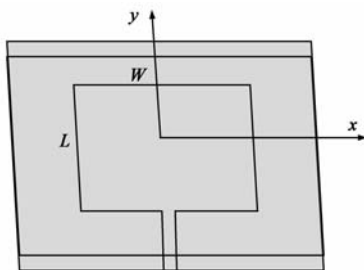


图2 天线单元结构图

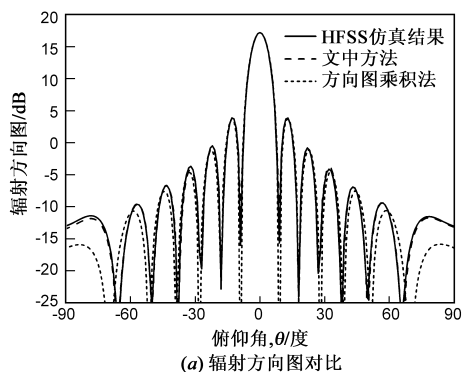
为了说明文中方法相对经典的方向图乘积法的精确性,文中同时提供了如式(2)和(3)所示的阵列辐射和散射方向图乘积法计算所得结果和 HFSS 仿真结果.

### 3.1 实例 1

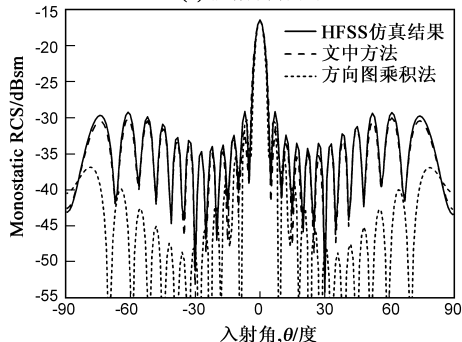
受限于笔者所用计算机的计算能力,对于图 2 所示天线单元,只能精确仿真计算到 16 元直线阵的辐射和散射场. 同时,由于单元靠得越近,互耦越强,近似方法计算结果的误差就会更大. 因此,为了说明文中方法计算单元间互耦影响的精确性,首先应用文中方法计算了 16 元直线阵的辐射和散射方向图,并将单元间距  $d_0$  设置为较小的 0.4 $\lambda$ .

图 3(a)为 16 元阵的辐射方向图对比图,其中实线为 HFSS 仿真结果,虚线为文中方法计算结果,点线为方向图乘积法计算结果. 这里以 HFSS 计算结果为参考值,可见,运用方向图乘积法所得的辐射方向图,除了在主瓣及第一副瓣区域与 HFSS 计算结果吻合良好外,其它角域的计算结果与 HFSS 均有不同程度的误差,并且,随着角度偏离主瓣方向,其误差呈增大趋势,当到了第三副瓣区域以后,零深和波形相对 HFSS 计算结果都已偏离,从而使其无法用来精确预估大型阵列的辐射方向图. 而对比文中方法计算结果和 HFSS 仿真结果可以发现,在整个角域,二者基本一致,充分说明了文中方法考虑互耦计算大型阵列辐射方向图的精确性.

当一频率为天线中心工作频率、 $\phi$  极化单位幅度均匀平面波照射该阵列时,其单站 RCS 方向图如图 3(b)



(a) 辐射方向图对比



(b) 单站 RCS 方向图对比

图3  $\phi = 0^\circ$  面  $d_0 = 0.4\lambda$  时 16 元均匀线阵方向图对比图

所示,其中实线为 HFSS 仿真结果,虚线为文中方法计算结果,点线为方向图乘法计算结果.对比发现,运用散射方向图乘法所得的单站 RCS 方向图除主瓣区域以外,与 HFSS 仿真结果均有不小的误差;而运用文中方法所得结果在整个角域与 HFSS 仿真结果基本一致,证实了文中方法考虑互耦计算大型阵列天线散射方向图的正确性.

### 3.2 实例 2

为考察文中方法的稳定性,这里将该 16 元线阵的单元间距  $d_0$  更改为  $0.67\lambda$  为例来进行论证.

图 4(a) 为 16 元阵的辐射方向图对比图,对比发现,当单元间距增大以后,单元间的互耦减小,方向图乘积法的计算结果的误差减小.其主瓣及前四个副瓣区域以内与 HFSS 计算基本一致,在第五副瓣以后的角域,零深已经与 HFSS 仿真结果接近,但是幅值仍有一定的误差.而文中方法计算结果与 HFSS 仿真结果仍吻合良好,说明了文中方法计算阵列辐射场的精确度并不受单元间距变化的影响,稳定性极高.

图 4(b) 为其单站 RCS 方向图,可见,由于单元间距大于  $0.5\lambda$ ,故在  $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$  角域内出现了两个散射栅瓣 (grating lobe)<sup>[15]</sup>,这两个栅瓣的位置可以利用式 (3) 来准确预估.对比发现,单元间距拉大后,方向图乘积法的准确度提高了,并能准确预估到两个散射栅瓣的位置,然而,随着入射角偏离主散射方向,其计算误差增大,从而使其无法用来精确预估大型阵列的散射

方向图,但是,文中方法计算结果仍然与 HFSS 仿真结果吻合良好.

观察图 3 和图 4 可以发现,虽然当单元间距由  $0.67\lambda$  减小为  $0.4\lambda$  以后,单元间的耦合强度变大,但文中方法的计算误差并未增大,其计算结果均与 HFSS 仿真结果几乎一致.说明了文中方法计算阵列的辐射和散射场不仅具有极高的精度,而且稳定性极强.由于该方法将 16 元阵的辐射和散射计算问题转化为一个 7 元阵和一个 8 元阵的计算问题,从而极大地减小了计算量.当阵列规模大于 16 元以后,运用笔者的计算机将无法精确仿真得到其辐射和散射场,但运用文中方法,仍可以十分快速的精确实现,并且其计算量和计算时间随阵列规模的增大几乎没有改变,因而极其高效.

## 4 结论

文中通过公式推导,简化了传统意义下的有源单元方向图法的操作过程,将大型阵列的计算问题转化为两个小型阵列的总场计算问题.不仅避免了逐个计算并提取阵列环境中各个单元辐射和散射场的复杂和耗时的操作过程,而且解决了利用有源单元方向图法结合仿真软件无法计算大型阵列散射的难题.实例验证该方法与 HFSS 具有同样的精确度,因而,该方法对工程实践中,大型阵列天线辐射和散射的准确预估具有很强的应用价值和指导意义.受限于笔者计算机的计算能力,仅给出了该方法在直线阵中的应用,同样的,它可以用来精确计算大型平面阵列的辐射和散射场.

### 参考文献

- [1] Balanis C A. Antenna Theory [M]. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [2] 陈客松,何子述,韩春林.非均匀线天线阵优化布阵研究[J].电子学报,2006,34(12):2263-2267.  
Chen Ke-song, He Zi-shu, Han Chun-lin. Research on synthesis of the linear sparse arrays[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12):2263-2267. (in Chinese)
- [3] Lu B, Gong S X, Zhang S, et al. Optimum spatial arrangement of array elements for suppression of grating-lobes of radar cross section[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9(1):114-117.
- [4] Lu B, Gong S X, Zhang S, et al. A new method for determining the scattering of linear polarized element arrays[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2009, 7(1):87-96.
- [5] 姜永金,潘道春,傅文斌,等.不规则贴片微带天线的 MP-STD-FDTD 混合算法分析[J].电子学报,2009,37(6):1367-1372.  
Jiang Yong-jin, Pan Yi-chun, Fu Wen-bin, et al. Analysis of ir-

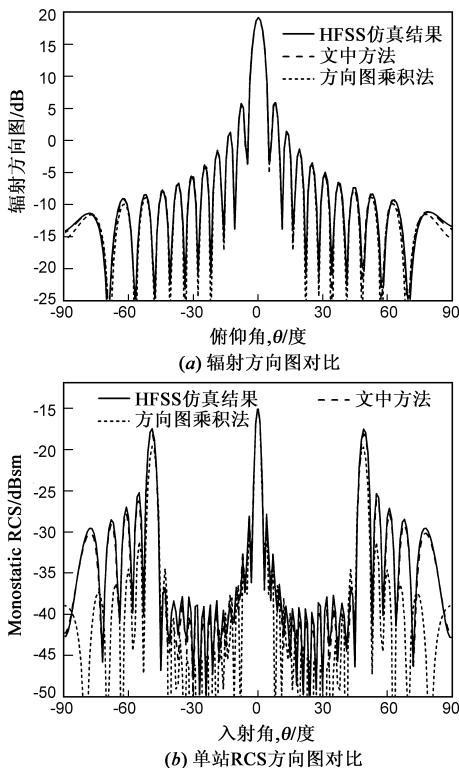
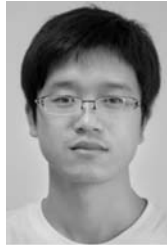


图4  $\phi=0$ 面 $d_0=0.67\lambda$ 时16元均匀线阵方向图对比图

- regular microstrip patch antenna using hybrid MPSTD-FDTD method[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(6): 1367 – 1372. (in Chinese)
- [6] Pozar D M. The active element pattern[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(8): 1176 – 1178.
- [7] Kelly D F, Stutzman W L. Array antenna pattern modeling methods that include mutual coupling effects[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1993, 41(12): 1625 – 1632.
- [8] Toh B Y, Fusco V F, Buchanan N B. Retrodirective array tracking prediction using active element characterization[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(12): 727 – 728.
- [9] Johnson J M, Rahmat-Samii Y. Genetic algorithms and method of moments (GA/MoM) for the design of integrated antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1999, 47(10): 1606 – 1614.
- [10] 杨帆, 张雪霞. 遗传算法在微带天线优化中的应用[J]. *电子学报*, 2000, 28(9): 91 – 95.  
Yang Fan, Zhang Xue-xia. The application of genetic algorithms in microstrip antenna optimization[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(9): 91 – 95. (in Chinese)
- [11] Jin N B, Rahmat-Samii Y. Parallel particle swarm optimization and finite difference time-domain (PSO/FDTD) algorithm for multiband and wide-band patch antenna designs [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(11): 3459 – 3468.
- [12] He Q Q, Wang B Z. Design of microstrip array antenna by using active element pattern technique combining with taylor synthesis method[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2008, 80(1): 63 – 76.
- [13] Kishk A A. Prediction of large array characteristics from small array parameters [A]. Presented at the European Antennas Propagation Conference [C]. USA: IEEE Press, 2008. 1 – 5.
- [14] Karimkashi S, Kishk A A. Focused microstrip array antenna using a dloph-chebyshev near-field design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(12): 3813 – 3810.
- [15] Tittensor P J, Newton M L. Prediction of the radar cross-section of an array antenna [A]. Proceedings of Sixth International Conference on Antennas and Propagation [C]. London, UK, 1989. 258 – 262.

### 作者简介



张 帅 男, 1983 年 9 月生于湖北省随州市. 现为西安电子科技大学博士研究生, 主要研究方向为阵列天线设计, 电磁散射与隐身技术等.

E-mail: zhangshuai@mail.xidian.edu.cn



龚书喜 男, 1957 年 3 月生于河北省霸州市. 现为西安电子科技大学教授、博士生导师, 西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室主任. 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.

E-mail: shxgong@xidian.edu.cn