

基于改进 GA-FFT 综合含互耦效应的不等间隔阵列赋形方向图

游鹏飞 刘颜回^{*} 黄鑫 朱春辉 柳清伙

(厦门大学电子科学系 厦门 361005)

(杜克大学电气与计算机工程系 达勒姆 27708)

摘要: 该文提出了一种虚拟的最小均方有源单元方向图展开方法, 将不等间隔阵列的有源方向图展开为一个虚拟的均匀间隔阵列的若干单元辐射的叠加。通过该方法, 对包含阵元耦合效应的不等间隔阵列方向图, 可以使用快速傅里叶变换进行加速计算。并且, 该文将这个方法与遗传算法(GA)相结合, 得到一种改进的 GA-FFT 方法, 可以应用于解决含阵元互耦的不均匀间隔阵列的赋形波束综合问题。最后, 分别对不等间隔的偶极子阵列平顶方向图及微带阵列的余割平方方向图进行了综合, 结果表明所提方法的有效性和优势。

关键词: 不等间隔阵列; 阵元互耦; FFT; 波束赋形

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)08-2107-06

DOI: 10.11999/JEIT151189

Modified GA-FFT for Synthesizing Shaped Pattern of Unequally Spaced Array in Presence of Mutual Coupling

YOU Pengfei LIU Yanhui HUANG Xin ZHU Chunhui LIU Qinghuo

(Department of Electronic Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

(Department of Electrical and Computer Engineering, Duke University, Durham 27708, USA)

Abstract: A new Virtual Least-Square Active Element Pattern Expansion (VLS-AEPE) method is presented in this paper, which considers each active element pattern of an unequally spaced array as the one radiated by some of equally spaced elements of a virtual array. Using the help of this method, the pattern of an unequally spaced array including mutual coupling can be efficiently calculated by FFT. In addition, this method is combined with the Genetic Algorithm (GA) to deal with the shaped pattern synthesis problem for unequally spaced linear arrays. Two synthesis experiments including the synthesis of flat-top pattern for an unequally spaced dipole array and the synthesis of cosec-squared pattern for an unequally spaced microstrip array are conducted to verify the effectiveness and advantages of the proposed algorithm.

Key words: Unequally spaced linear array; Element mutual coupling; FFT; Shaped pattern synthesis

1 引言

在阵列天线综合问题中, 许多迭代综合方法如交替投影法、随机优化算法等, 具有广泛的应用^[1-3]。在这些方法中, 遗传算法(Genetic Algorithm, GA)由于其鲁棒性和普适性, 被广泛地用来搜索全局最优解。然而同其他迭代算法一样, 遗传算法也需要大量反复地计算阵列方向图, 计算时间较长。因此, 对于迭代综合方法而言, 加快阵列方向图的计算, 可以显著降低这些方法的计算复杂度。对等

间隔阵列而言, 假定各单元具有相同的单元方向图的情况下, 可以采用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)来加速阵因子的计算, 如 GA-FFT 方法^[4]。近年来, 一些学者又将这些方法与非均匀快速傅立叶变换(Non-Uniform Fast Fourier Transform, NUFFT)相结合, 将之推广应用于不等间隔阵列的阵因子计算^[5-8], 其中 GA-NUFFT^[8]方法就是主要代表之一。然而, 这种基于 NUFFT 的阵列综合算法依然只适用于具有相同单元方向图的情况, 不能考虑实际阵列中阵元互耦等因素导致的单元方向图的差异影响。

众所周知, 采用有源单元方向图来计算阵列方向图, 可以包含阵元耦合以及阵列安装环境的影响^[9,10]。然而, 由于有源单元方向图各不相同, 无法提取阵列因子, 不能应用 FFT 或 NUFFT 来加速。

收稿日期: 2015-10-29; 改回日期: 2016-04-08; 网络出版: 2016-05-24

*通信作者: 刘颜回 yanhuiliu@xmu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61301009), 中央高校基本科研业务费(20720160081)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61301009), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (20720160081)

为了克服这一问题,许多学者提出了一些近似方法。在文献[11]中,将等间隔直线阵列的单元分为两类:阵中单元和边沿单元。阵中单元享有共同的单元方向图,可以采用 FFT 计算这部分单元对总阵列方向图的贡献,边沿单元方向图各不相同,则需要直接求和计算。该方法比较适合于电大规模的等间隔阵列问题。文献[12]将每一个有源单元方向图看成由整个阵列耦合激励的阵因子与单元孤立存在时的方向图的乘积。尽管该方法适用于任意间隔阵列,但由于需要求解每一个有源单元方向图对应的所有阵元的耦合系数,需要较高的计算复杂度。

最近,文献[13]提出了一种最小均方有源单元方向图展开(Least-Square Active Element Pattern Expansion, LS-AEPE)方法。该方法将有源单元方向图看成是阵列中部分相邻单元辐射的叠加,对每一个有源单元方向图而言,仅需要求解少数几个单元的耦合系数。为减少这种近似误差,耦合系数由最小均方误差准则获得。应用该方法,等间隔阵列的方向图可以使用标准的 FFT 加速,并且可以包含阵元互耦以及安装环境的影响。本文将该方法推广应用于含阵元互耦效应的不等间隔阵列的赋形波束综合问题。与文献[13]不同,针对实际的不等间隔阵列情况,我们需要构造一个虚拟的等间隔阵列,将每一个有源单元方向图看成是虚拟阵列中若干等间隔单元的辐射叠加形成,且虚拟单元的激励系数也由最小均方误差准则给出。我们称这个方法为虚拟的最小均方有源单元方向图展开方法。并且,本文将这个方法与 GA 方法结合,得到一种改进的 GA-FFT 方法,可以有效地对含阵元互耦的不等间隔阵列进行优化。最后使用该方法综合了不等间隔偶极子阵列的平顶方向图以及不等间隔微带阵列的余割平方方向图,结果证明了本文方法的有效性和优势。

2 不等间隔阵列有源单元方向图的最小均方误差展开

以 N 元非均匀间隔线阵为例,阵元分布在 X 轴上,阵列方向图可以表示为

$$f(u) = \sum_{n=1}^N w_n g_n(u) e^{j\beta x_n u} \quad (1)$$

其中, $\beta = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, $u = \sin(\theta)$, w_n 是第 n 个阵元的激励, x_n 表示第 n 个阵元的位置, $g_n(u)$ 是第 n 个阵元扣除空间相位差后的有源单元方向图(坐标原点在对应阵元的相位中心)。一个天线单元的有源单元方向图(AEP)是指在阵列环境

中,仅有该单元被激励而其他所有单元均接负载匹配时,阵列辐射的方向图。有源单元方向图可以通过实际测量或全波仿真的手段得到。应用式(1)所计算的阵列方向图,可以包含阵元耦合以及阵列环境的影响。然而,由于阵元是不等间隔分布,并且阵列中不同位置的单元天线具有不同的有源方向图,不能直接采用 FFT 技术加速阵列方向图的计算。即使采用文献[5-8]等 NUFFT 技术,亦不能处理这种含有有源单元方向图的情况。最近,我们针对均匀间隔阵列的情况,提出了有源单元方向图的最小均方展开方法。该方法将阵元的有源方向图展开为附近若干个单元上几个理想方向图的加权叠加,加权系数则根据最小均方误差准则得到。由于本文考虑不等间隔阵列的情况,直接应用该方法,不能使用 FFT 加速阵列方向图的计算。

为应用 FFT 加速计算,我们将实际的不等间隔阵列插值为虚拟的等间隔阵列,如图 1 所示。实际阵列中的每个有源单元方向图可以视为其邻近位置的若干个虚拟单元组成的虚拟子阵辐射造成的。这样实际的不等间隔阵列中的每个有源单元方向图可以展开为虚拟的等间隔阵列中若干个邻近位置的虚拟单元方向图的加权叠加。如图 1 所示,在第 1 个线框中的 5 个等间距虚拟阵元组成的虚拟子阵用来插值实际阵列中的第 1 个阵元,即用该虚拟子阵辐射的方向图来近似第 1 个有源单元方向图。以此类推,相同的方法依次处理实际阵列中每一个有源单元方向图。

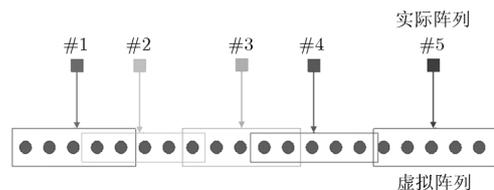


图 1 用虚拟的等间隔阵列展开实际阵列的有源单元方向图

因此,我们有

$$\begin{aligned} g_n(u) &= g_s(u) \sum_{q=-Q/2}^{Q/2} c_{nq} e^{j\beta \left[\frac{x_n - x_1}{d} \right]_{d+x_1-x_n+qd} u} \\ &= g_s(u) e^{j\beta \left[\frac{x_n - x_1}{d} \right]_{d+x_1-x_n} u} \sum_{q=-Q/2}^{Q/2} c_{nq} e^{j\beta q d u} \quad (2) \end{aligned}$$

其中, $(Q+1)$ 为虚拟子阵的阵元数目, $d = \frac{x_N - x_1}{rN - 1}$ 为虚拟均匀阵列的阵元间距, r 是过采样因子, $\left[\frac{x_n - x_1}{d} \right]$ 表示与 $\frac{x_n - x_1}{d}$ 最接近的整数, 系数 c_{nq} 表示实际阵列中第 n 个阵元对虚拟阵列中第

$\left(\left\lceil \frac{x_n - x_1}{d} \right\rceil + q\right)$ 个阵元的耦合效应, $g_s(u)$ 是对所有有源单元方向图的平均方向图, 即

$$g_s(u) = \frac{1}{N} \left(\sum_{n=1}^N g_n(u) \right) \quad (3)$$

为减少式(2)中有源方向图展开的近似误差, 虚拟单元的激励系数 c_{nq} 通过求解最小化均方误差问

$$\mathbf{Z}_n = \begin{pmatrix} g_s(u_1) e^{j\beta \left\lceil \frac{x_n - x_1}{d} \right\rceil d + x_1 - x_n} u_1 e^{j\beta d u_1 (-Q/2)} & \dots & g_s(u_1) e^{j\beta \left\lceil \frac{x_n - x_1}{d} \right\rceil d + x_1 - x_n} u_1 e^{j\beta d u_1 (Q/2)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_s(u_M) e^{j\beta \left\lceil \frac{x_n - x_1}{d} \right\rceil d + x_1 - x_n} u_M e^{j\beta d u_M (-Q/2)} & \dots & g_s(u_M) e^{j\beta \left\lceil \frac{x_n - x_1}{d} \right\rceil d + x_1 - x_n} u_M e^{j\beta d u_M (Q/2)} \end{pmatrix} \quad (7)$$

上述问题的最小均方误差解为 $\mathbf{c}_n = (\mathbf{Z}_n^H \mathbf{Z}_n)^{-1} \mathbf{Z}_n^H \mathbf{g}_n$, 因此该方法被称为虚拟的有源单元方向图的最小均方展开方法(Virtual Least-Square Active Element Pattern Expansion, VLS-AEPE)。

3 改进的 GA-FFT 综合具有阵元互耦的不等间隔阵列赋形方向图

将式(2)代入式(1), 我们可以重写阵列方向图的表达式为

$$f(u) = g_s(u) e^{j\beta u(x_1 - Qd/2)} \sum_{l=0}^{\lceil rN \rceil + Q - 1} a_l e^{j\beta l d u} \quad (8)$$

其中

$$a_l = \sum_{\substack{l = \lceil (x_n - x_1)/d \rceil + q + Q/2 \\ -Q/2 \leq q \leq Q/2}} c_{nq} w_n \quad (9)$$

在 u 域上均匀采样, 则可以直接应用标准 FFT 来实现式(8)的加速计算。可见, 通过上述处理后, 可以实现在考虑阵元互耦情况下不等间隔阵列方向图的 FFT 加速。

结合不同的阵列综合策略, 上述方法可以应用到不同的阵列综合问题。这里, 我们考虑非均匀间隔阵元的赋形功率方向图综合问题。赋形功率方向图的综合是一个高度非线性的问题, 我们应用遗传算法(GA)来搜索阵元激励的全局最优解^[4]。在 GA 算法中, 每一个个体(或者染色体)关联一组阵列激励。对于 N 元阵列, 每组优化变量具有 $2N$ 的维度。其中, 前 N 个元素代表阵列激励的幅度, 采用实数编码, 取值范围为 $[0, 1]$; 后 N 个元素代表阵列激励的相位, 采用实数编码, 取值为 $[-\pi, \pi]$ 。对于方向图综合问题, 我们关心的是阵元激励幅度和相位分布的相对大小, 而不是它们的绝对值。因此, 对位置固定的 N 元阵列而言, 其实际自由度为 $2N - 2$ 。在赋形功率方向图优化过程中, 我们设定的目标函数为最小化赋形区域上功率方向图与期望函数的误差, 并增加不同区域的方向图边界控制以及最大激

题得到:

$$\min_{\mathbf{c}_n} \|\mathbf{g}_n - \mathbf{Z}_n \mathbf{c}_n\|_2^2 \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{c}_n = [c_{n,-Q/2}, c_{n,-Q/2+1}, \dots, c_{n,Q/2}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{g}_n = [g_n(u_1), g_n(u_2), \dots, g_n(u_M)]^T \quad (6)$$

励幅度比的约束条件。数学表述为

$$\begin{cases} \min \|P(u_m) - P_d(u_m)\|_2^2, & u_m \in \text{赋形区域} \\ \text{s.t.} \begin{cases} L(u_m) \leq P(u_m) \leq U(u_m), & u_m \in [-1, 1] \\ \max\{w_n\} / \min\{w_n\} \leq \text{DRR} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $P(u) = |f(u)|^2$ 为功率方向图, $P_d(u)$ 为期望的功率方向图。 $L(u_m)$ 和 $U(u_m)$ 代表方向图的上界和下界, 可以用来表示复杂的辐射要求, 包括波束赋形和精确的副瓣控制。DRR 用于约束阵列激励中最大的激励幅度和最小的激励幅度之比。

在 GA 综合算法中, 假定每一代进化中的每一个个体都需要计算阵列方向图。对于 M 个采样点的一次阵列方向图计算, 对式(1)直接求和需要 MN 次复数乘法, 而应用 VLS-AEPE 方法可借用 FFT 对式(8)进行计算, 仅需要 $(Q+1)rN + K/2 \log_2 K + M(Q \ll N)$ 次复数计算(假定使用基 2 的 FFT 算法, 其中 $K = 2^{\lceil \log_2 M \rceil}$, $\lceil x \rceil$ 表示对 x 向上取整)。设置 $M = 8N$, $r = 2$, $Q = 6$, 图 2 显示了这两种方法计算阵列方向图所需的复乘数目。可见, 当阵元数目 N 大于 7 时, VLS-AEPE FFT 方法比直接求和方法需要更少的复乘次数, 且随着 N 的增大, 这种计算优势更为明显。如果使用混合基的 FFT 算法, 比如基 2 和基 4 的混合算法, 还可以进一步提高计算效率。由于 GA 算法需要大量多次进行阵列方向图计算, 应用 VLS-AEPE FFT 方法可以大大提高计算效率。

4 数值结果

4.1 平顶方向图综合

考虑一个 12 元非均匀间隔的线阵, 阵元位置由 FBMPM^[14] 方法得到。在文献[14]中, FBMPM 方法假设单元为理想点源, 得到了满足边界的平顶赋形方向图。然而在实际阵列中, 由于单元互耦效应的存在, FBMPM 方法优化的权值在实际全波仿真或测试中得到的结果往往存在较大的误差。本文考

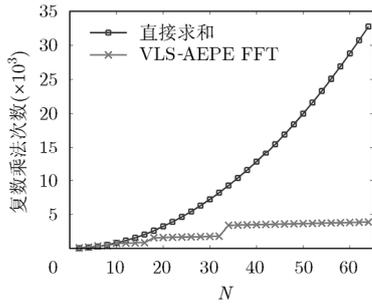


图 2 计算阵列方向图所需的复乘次数与阵列规模的关系

考虑单元天线为工作频率在 1 GHz 的偶极子天线，阵列模型如图 3 所示。该阵列的有源方向图可以使用全波仿真软件如 HFSS 得到。

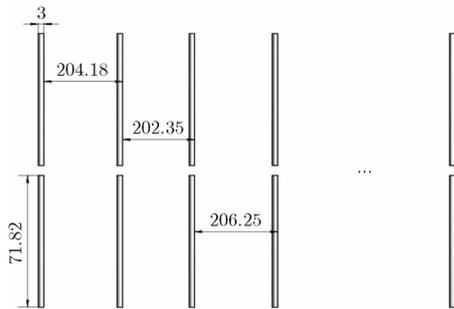


图 3 12 元不等间隔偶极子天线阵列(mm)

为了评估 VLS-AEPE 方法用于展开该阵列有源单元方向图的精度，我们定义误差为

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} \left\| g_n(u) - g_s(u) e^{j\beta \left[\left(\frac{x_n - x_1}{d} \right) d + x_1 - x_n \right] u} \sum_{q=-Q/2}^{Q/2} c_{nq} e^{j\beta q d u} \right\|_2^2}{\sum_{n=0}^{N-1} \|g_n(u)\|_2^2}} \quad (11)$$

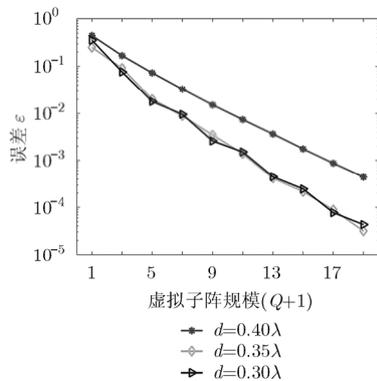


图 4 VLS-AEPE 方法的误差 ε 与参数 d, Q 的关系

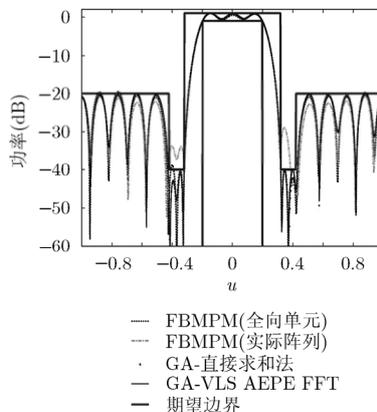


图 5 12 元不等间隔线阵平顶方向图综合结果

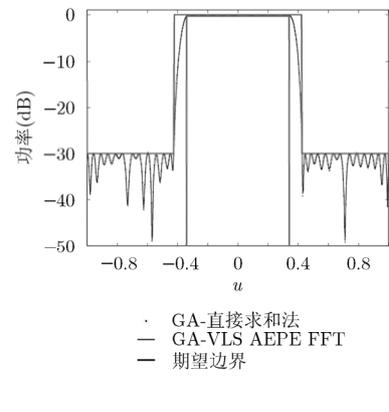


图 6 41 元不等间隔线阵平顶方向图综合结果

图 4 显示了误差 ε 与参数 d 和 Q 的关系。由图 4 可见，对于固定的 d, Q 越大，误差就越小；对于固定的 Q, d 减小也会降低误差。但是当 $d \leq 0.35\lambda$ 时，减小 d 并不能降低误差。这是由于在固定 Q 的情况下， d 减小意味着用来展开有源方向图的虚拟子阵的间距变小，同时所用的口径也越小了，抵消了小间距带来的精度改善。在这个例子中，我们取 $d = 0.35\lambda, Q = 6$ 。这时，12 元含耦合的不等间隔线阵可以转换为 30 元虚拟的等间隔线阵。采用虚拟子阵展开后，可以采用 FFT 来计算阵列方向图，并使用 GA 算法对激励和相位进行优化，使得综合的方向图满足波束赋形和副瓣控制的要求。如图 5 所示，使用点源假设的 FBMPM 方法综合的激励，在用于图 3 所示的偶极子阵列后，由于阵元互耦的存在，所得方向图在低副瓣电平区域不能满足 -40 dB 的要求。而采用本文方法优化后，所得阵列方向图完全满足所给定的副瓣及波束赋形要求。另外，我们约束了最大激励幅度比为 3.4，略小于文献[14]中给出的激励幅度比 3.6。

由图 2 可知，阵列规模越大，VLS-AEPE FFT 对于阵列方向图计算的加速效果越显著。因此，考虑扩大阵列规模，对一个 41 元不等间隔的线阵综合平顶方向图，如图 6 所示。单元天线仍然选用图 3 所示的偶极子天线，单元位置由文献[15]给出。采用本文提出的 GA-VLS AEPE FFT 方法对激励进行优化，考虑了单元方向图以及互耦效应，所得阵列的方向图与 GA-直接求和方法得到的结果吻合得比较好，均严格满足期望的方向图边界：赋形区域波束宽度和波纹响应幅度分别为 40° 和 0.3 dB，副瓣区域电平控制在 -30 dB 以下。

4.2 余割平方方向图综合

考虑对一个 13 元不等间隔的线阵综合余割平方方向图。假定单元天线为工作频率在 2.45 GHz

的微带天线,单元位置由文献[16]给出,阵列模型如图 7 所示。如果采用文献[16]给出的激励,由于微带单元方向图的调制以及相邻单元耦合的存在,所得阵列的方向图超出期望的方向图边界,如图 8 所示。而采用本文提出的 GA-VLS AEPE FFT 方法对激励进行优化后,满足了波束赋形和副瓣控制的要求,修正了直接使用文献[16]给出的激励,由于未考虑单元方向图以及互耦而产生的误差。另外,我们约束了激励幅度比为 5.1,而文献[16]中所得结果的激励幅度比为 9.6。

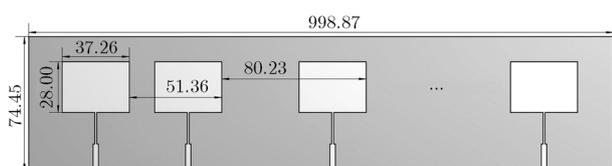


图 7 13 元不等间隔微带阵列(mm)

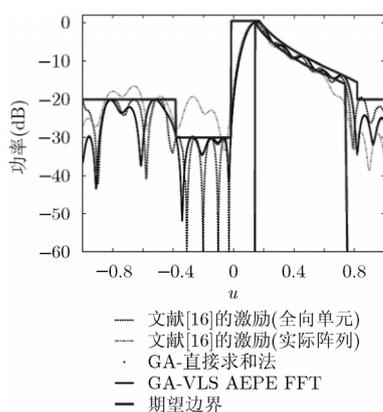


图 8 13 元不等间隔微带阵列余割平方方向图综合结果

5 结束语

本文针对不等间隔阵列,提出了一种虚拟的最小均方有源单元方向图展开方法。可以在考虑阵元电磁耦合的情况下,对阵列方向图计算进行 FFT 加速。将该方法与遗传算法相结合,得到了一种改进的 GA-FFT 方法,可以对考虑互耦的不等间隔阵列进行方向图赋形综合。最后,我们对不等间隔的偶极子阵列进行平顶方向图综合,对不等间隔的微带阵列进行了余割平方方向图综合,所得结果严格满足预先设定的波束赋形及副瓣区域的要求,证明了本文方法的有效性。

另外,本文方法可以进一步推广到考虑安装平台对天线阵列的影响。对于安装在平台上的天线阵列,可以采用测试的有源单元方向图,运用本文方法依然具有可行性。

参考文献

- [1] WANG X, ABOUTANIOS E, and AMIN M G. Thinned array beam pattern synthesis by iterative soft-thresholding-based optimization algorithms[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(12): 6102-6113. doi: 10.1002/MOP.10823.
- [2] 赵宜楠, 张涛, 李凤从, 等. 基于交替投影的 MIMO 雷达最优波形设计[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(6): 1368-1373. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01198.
ZHAO Y N, ZHANG T, LI F C, et al. Optimal waveform design for MIMO radar via alternating projection[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1368-1373. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01198.
- [3] 于波, 陈客松, 朱盼, 等. 稀布圆阵的降维优化方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(2): 476-481. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00526.
YU B, CHEN K S, ZHU P, et al. An optimum method of sparse concentric rings array based on dimensionality reduction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(2): 476-481. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00526.
- [4] WANG L L, FANG D G, and SHENG W X. Combination of Genetic Algorithm(GA) and Fast Fourier Transform(FFT) for synthesis of arrays[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, 37(1): 56-79. doi: 10.1002/MOP.10823.
- [5] LIU Q H and NGUYEN N. An accurate algorithm for NonUniform Fast Fourier Transforms (NUFFT's)[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1998, 8(1): 18-20. doi: 10.1109/75.650975.
- [6] YANG K, ZHAO Z Q, and LIU Q H. Fast pencil beam pattern synthesis of large unequally spaced antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(2): 627-634. doi: 10.1109/TAP.2012.2220319.
- [7] LIU J Z, ZHAO Z Q, YANG K, et al. A hybrid optimization for pattern synthesis of large antenna arrays[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2014, 145: 81-91. doi: 10.2528/PIER13121606.
- [8] JIANG M L, CHEN R S, ZHOU L, et al. Synthesis of arrays with Genetic Algorithm(GA) and Nonuniform Fast Fourier Transform (NFFT)[C]. *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings(APMC)*, Suzhou, China, 2005, 4: 2. doi: 10.1109/APMC.2005.1606885.
- [9] POZAR D M. The active element pattern[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1994, 42(8): 1176-1178. doi: 10.1109/8.310010.
- [10] POZAR D M. A relation between the active input impedance and the active element pattern of a phased array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(9): 2486-2489. doi: 10.1109/TAP.2003.816302.

- [11] KELLY D F and 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. doi: 10.1109/8.273305.
- [12] STEYSKAL H and HERD J S. Mutual coupling compensation in small array antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, 38(12): 1971-1975. doi: 10.1109/8.60990.
- [13] YOU P F, LIU Y H, HUANG X, et al. Efficient phase-only linear array synthesis including coupling effect by GA-FFT based on least-square active element pattern expansion method[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(10): 791-792. doi: 10.1049/EL.2015.0431.
- [14] LIU Y H, NIE Z P, and LIU Q H. A new method for the synthesis of non-uniform linear arrays with shaped power patterns[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2010, 107: 349-363. doi: 10.2528/PIER10060912.
- [15] WANG F, BALAKRISHNAN V, ZHOU P Y, et al. Optimal array pattern synthesis using semidefinite programming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(5): 1172-1183. doi: 10.1109/TSP.2003.810308.
- [16] FUCHS B. Synthesis of sparse arrays with focused or shaped beam pattern via sequential convex optimizations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(7): 3499-3503. doi: 10.1109/TAP.2012.2196951.
- 游鹏飞：男，1986年生，博士生，研究方向为阵列综合与设计。
刘颜回：男，1983年生，副教授，博士生导师，研究方向为天线设计与阵列理论、阵列信号处理。
黄鑫：男，1991年生，硕士生，研究方向为阵列综合与设计。

“在线社交网络的挖掘与分析”专题征文通知

在线社交网络正成为社会关系维系和信息传播的重要渠道和载体，虚拟的社交网络和真实社会的交融互动对社会的直接影响越来越大，直接影响国家安全与社会稳定。为了满足其在个人生活、社会管理创新和国家战略安全等层面的广泛需求，《电子与信息学报》拟推出“在线社交网络的挖掘与分析”专题报道，现发布专题征文通知。本专题将围绕社交网络的“结构特性”、“群体行为与互动规律”、“信息传播”3个核心问题组稿，旨在推进社交网络分析与网络信息传播的基础理论和关键技术的研究。

1 专题主编

滨兴院士(北京邮电大学)、许进教授(北京大学)、贾焰教授(国防科技大学)。

2 征文范围

“在线社交网络的挖掘与分析”专栏重点从以下几方面，征集高质量的研究论文：(1)在线社交网络结构特征分析及建模；(2)虚拟社区发现与演化分析；(3)在线社交网络用户行为分析；(4)在线社交网络情感分析；(5)个体影响力及群体影响机制理论；(6)个性化推荐和链路预测方法；(7)社交网络的内容表示和管理；(8)面向社交网络的信息检索；(9)在线社交网络信息传播建模与预测；(10)影响最大化计算方法；(11)在线社交网络的话题发现与演化。

所征集的论文内容不限于以上方面，所有与在线社交网络分析与信息传播相关的高水平论文均接受投稿。为保证“在线社交网络的挖掘与分析”专栏文章的质量，最终录取文章数量由征集到的稿件的质量和审稿情况决定。

3 投稿要求

稿件类型要求：前瞻性的研究论文，高质量的综述论文。稿件尚未公开发表，并非一稿多投；无抄袭、剽窃、侵权等不良行为。

投稿方式：登录《电子与信息学报》网站(<http://jeit.ie.ac.cn/>)注册投稿。投稿时请在作者留言一栏中注明“社交网络专题”。

稿件格式：参照《电子与信息学报》论文模板。

截稿时间：2016年12月。