

文章编号 1005-0388(2011)04-0796-06

一种快速星载合成孔径雷达波束优化算法

石 力^{1,2} 孙慧峰^{1,2} 邓云凯² 艾加秋^{1,2} 刘 凡^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 针对星载合成孔径雷达(SAR),提出了一种快速的波束优化算法。该方法以快速傅里叶变换(FFT)为基础,对星载 SAR 的波束进行赋形,并压制了模糊区。利用快速傅里叶逆变换(IFFT)快速计算出方向图,然后和期望的方向图进行比较,对不满足期望方向图的区域,直接用期望方向图的值代替。重复上述操作,直到方向图满足设计要求。和原有的波束优化方法相比,该方法不做各种复杂操作,因而大大节省了优化时间,提高了速度。两个仿真结果都表明该方法实用、高效。

关键词 FFT;阵列天线;波束优化;有源相控阵

中图分类号 TN959.73 **文献标志码** A

1. 引 言

合成孔径雷达是一种高分辨率成像传感器,具有全天时和全天候观测的能力。这些特点使得星载 SAR 对波束的要求很高。采用固态有源相控阵天线的星载 SAR 一般具有多种工作模式,每种模式有多个波位,不同波位要求天线具有不同的波束。由于星载 SAR 有源相控阵天线一般采用分布式固态 T/R 组件,在发射模式下,T/R 组件为饱和放大,输出功率恒定,相位可量化控制;接收模式下,幅度和相位均可量化控制。因此,发射模式只优化 T/R 的相位,而接收模式下 T/R 的相位和幅度同时优化。

近年来,国内外对波束的优化提出了许多方法。文献[1]提出了一种快速的数值综合方法,该方法把幅度方向图和相位方向图作为辅助函数,以此计算出单元复数激励来满足期望方向图。文献[2]提出了设计任意形状口径综合平顶方向图的综合法。文献[3]使用部分相位加权的技术展宽了星载 SAR 的波束宽度。文献[4]提出了一种基于 FFT 的天线方向图的综合方法,相比于文章中的方法,操作过程过于繁杂。文献[5]-[8][9]利用遗传算法对相控阵天线单元的相位和幅度进行了校正和对方向图进行了综合。文献[10]使用了 FFT 计算方向图。

上述文献中,文献[1][2],[4]-[9]并没有对方向图的波束宽度严格地限制;文献[3][5]中变量数多,收敛速度慢,文献[10]只是用 FFT 计算了方向图,但并没使用 FFT 对方向图进行综合。而且上述文献中的算法操作复杂,计算时间长。

与这么多的综合方法相比,文章中的方法对波束宽度进行了严格的限定,并且压制了模糊区,而且不对计算出的方向图做各种复杂的操作,而是不满足期望方向图的区域,直接用期望方向图的值代替。因此,该方法大大节省了优化时间,提高了运算速度。

2. 算法描述

2.1 FFT与方向图的联系

对有限长序列 $x(n)$, 它的傅里叶变换式为

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} mn} \quad (1)$$

而它的离散傅里叶逆变换(IFFT)式为

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{j \frac{2\pi}{N} nm} \quad (2)$$

式中: $n, m = 0, 1, \dots, N$.

考察如图 1 所示天线的结构, d 为 T/R 的间距, d' 为 T/R 中单元的间距。设天线有 M 个 T/R,

收稿日期: 2010-10-22

基金项目: 863 计划项目(基金号:2009AA605061-3)

联系人: 石力 E-mail: shilisl@yahoo.com.cn

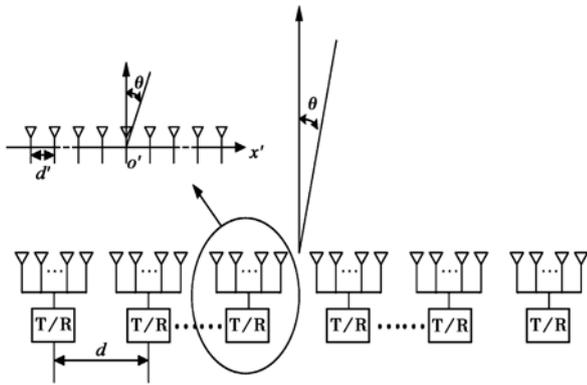


图 1 天线结构

每个 T/R 带 L 个单元,第 m 个 T/R 的激励复值为 I(m). 则其天线方向图函数可描述为

$$F = F_{TR} \times AF \tag{3}$$

式中: F_{TR} 是一个 T/R 的方向图, AF 为阵因子. F_{TR} 和 AF 可表示为

$$F_{TR} = \cos^{0.5}(\theta) \times \sum_{i=1}^L e^{jkx'_i \sin\theta} \tag{4}$$

$$AF = \sum_{m=0}^{M-1} I(m) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} m d \sin\theta} \tag{5}$$

式中: $\cos^{0.5} \theta$ 是 T/R 中单元方向图; x'_i 表示 T/R 中第 i 个单元的相对位置; λ 为自由空间波长.

1) IFFT 与天线阵因子函数的联系

进行 IFFT 的点数 N 应满足 $N \geq M$, 因对 I(m) 进行补零处理. 根据式(2)、式(5)可变为

$$AF(n) = \sum_{m=0}^{N-1} I(m) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} n \times m} \tag{6}$$

式中 $n = \frac{N}{\lambda} \times d \times \sin\theta$ (7)

比较式(2)和式(6),得

$$AF = N \times \text{IFFT}(I) \tag{8}$$

为了和方向图对应,对 $AF(n)$ 进行如下的列变换:

如图 2 所示,把 AF 矩阵从中心分为两个子矩阵,1 子矩阵和 2 子矩阵对换. 此时,由式(7),可得出与之对应的 u 的值.



图 2 矩阵变换

$$u = \sin\theta = \frac{n \times \lambda}{N \times d} \tag{9}$$

式中 $n = -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2} - 1$.

把式(9)代入式(4),得

$$F_{TR} = \cos^{0.5}(\arcsin u) \times \sum_{i=1}^L e^{jkx'_i u} \tag{10}$$

2) FFT 与阵列激励的联系

对于算法中得到的新的阵因子 AF 再次进行如图 2 所示的列变换,然后对 AF 进行 FFT 得出 N 个激励值 I,取前面的 M 既可.

2.2 u 空间与 theta 空间的转换

由式(7),可得

$$\theta = \arcsin \left[\frac{n \times \lambda}{N \times d} \right] \tag{11}$$

由天线原理可知,线阵的角度 theta 的全范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$,由式(9),知:

当 $d \leq \frac{\lambda}{2}$ 时,theta 可取全范围的值;当 $d > \frac{\lambda}{2}$ 时,

theta 只能覆盖角度的一部分范围,即 $\left[\sin^{-1} \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{d} \right), \sin^{-1} \left[\frac{N-1}{2N} \cdot \frac{\lambda}{d} \right] \right]$. 由于 IFFT 是周期性的,因此,无论 d 取什么值,theta 的取值范围已经包含了阵因子在区间 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 的所有信息.

2.3 FFT 的综合方法

文章提出的波束优化方法流程图如图 3.

该方法主要分为以下几个步骤:

第一步:确定 T/R 的数目 M, 每个 T/R 的单元数 L, FFT 的点数. 设定激励值 I 的复数初值为 1.

第二步:设定方向图主瓣区域的值,包括波束宽度和主瓣的形状,并且确定压制模糊区的范围和模糊区的副瓣值.

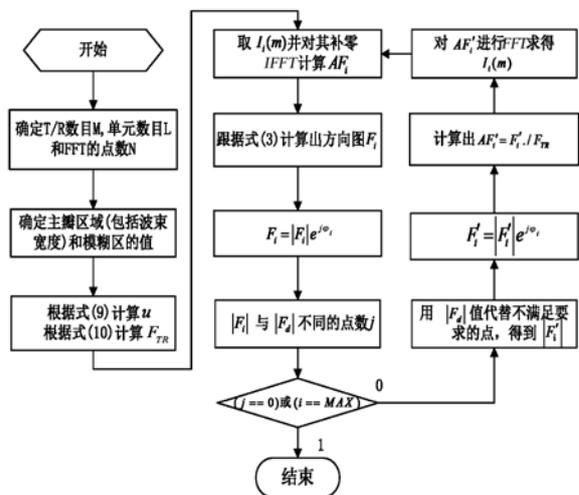


图 3 FFT 综合法流程图

第三步:根据式(9)计算出 u 值,并根据式(10)计算出每个 T/R 的方向图 F_{TR} .

第四步:对 $I_i(m)$ 进行补零,根据式(8)计算平面阵列的阵因子 AF_i . d 不论取什么值, u 区域中的值继续保留,因为在反求单元激励的时候,需要所有区域中的值.

第五步:根据式(3)计算出方向图 F_i .

第六步:把方向图 F_i 分解成幅度 $|F_i|$ 和相位 φ_i .

第七步:把副瓣区域的 $|F_i|$ 值与期望方向图的值 $|F_d|$ 进行比较,若 $|F_i|$ 不满足 $|F_d|$ 的点数为零或 i 达到了最大值,停止迭代,否则执行以下步骤.

第八步:对不满足期望值的区域,直接用期望方向图的值代替,得到新的幅度值 $|F'_i|$,再计算出新的 F'_i .

$$F'_i = |F'_i| \cdot e^{j\varphi_i}$$

第九步:据式(3)计算出阵因子 AF'_i .

$$AF'_i = F'_i / F_{TR}$$

第十步:对 AF'_i 进行 FFT 得出 N 个 $I'_i(m)$,取前面的 M 个值作为新的单元激励值 $I_{i+1}(m)$.

第十一步:重复第四步.

在星载 SAR 的发射模式下,由于功率放大器处于饱和状态,因此,只能对单元激励的相位进行优化.

单元激励的相位加权:和上述步骤不同的是:第十步中固定 $I(m)$ 的幅度不变,只变化它的相位既可.

在星载 SAR 的接收模式下,对单元激励的相位和幅度同时进行优化.

3. 仿真结果与分析

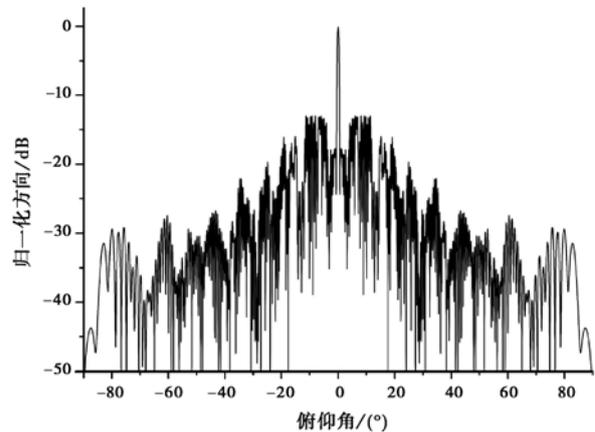
3.1 仿真结果

下面将用 2 个例子说明该方法的实用性,第一个例子是在发射模式下工作,第二个例子是在接收模式下工作,并且都给出在 matlab 软件下的计算时间以说明该方法的高效性.下面两个例子都是在 CPU 为酷睿二代 T7250,内存为 2G 的计算机上仿真的.

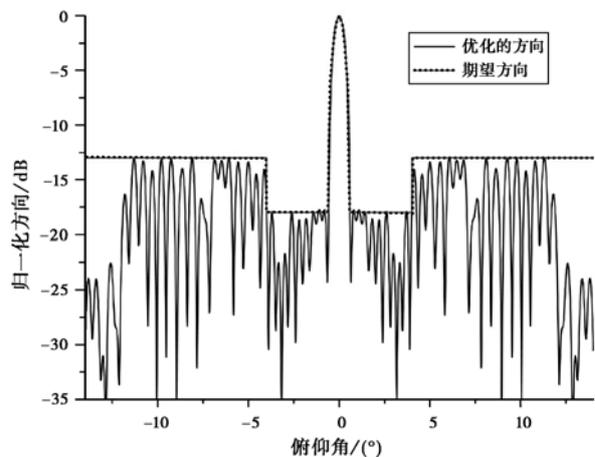
第一个例子的天线模型:只考虑 SAR 天线的距离向,有 240 个 T/R 组成,每个 T/R 带一个单元,天线的中心频率为 9.6 GHz. 单元间距为 20 mm,每个 T/R 的距离为 20 mm,不展宽时的波束宽度为 0.33° . 在发射模式下,波束宽度展宽为 2 倍;且最大副瓣为 -13 dB. 并且对区域 $[-4^\circ, -0.6^\circ]$ 和 $[0.6^\circ,$

$4^\circ]$ 进行了压制,压制到 -18 dB. FFT 的点数取 4096,迭代步骤为 2000 步,计算时间为 1 分 20 秒.

图 4 是发射模式下,波束展宽两倍的方向图,(a)是全范围的方向图,(b)是局部范围的方向图.从图 4(b)可以看出波束宽度满足要求,期望方向图与优化的方向图吻合得很好.图 5 是口径的相位分布.



(a) 全范围的方向



(b) 局部范围的方向

图 4 距离向方向图

第二个例子的天线模型:只考虑 SAR 天线的方向向,有 16 个 T/R 组成,每个 T/R 带 16 个单元,天线的中心频率为 9.6 GHz. 单元间距为 $\frac{\lambda}{2}$,每个 T/R 的距离为 8λ ,不展宽时的波束宽度为 0.397° . 在接收模式下,波束宽度展宽为 2 倍;且最大副瓣为 -20 dB. FFT 的点数取 4096,迭代步骤为 2000 步,计算时间为 1 分 13 秒.

图 6 是接收模式下,波束展宽两倍的方向图,图 6(a)是全范围的方向图,图 6(b)是局部范围的方向图.从图 4(b)可以看出波束宽度满足要求,期望方

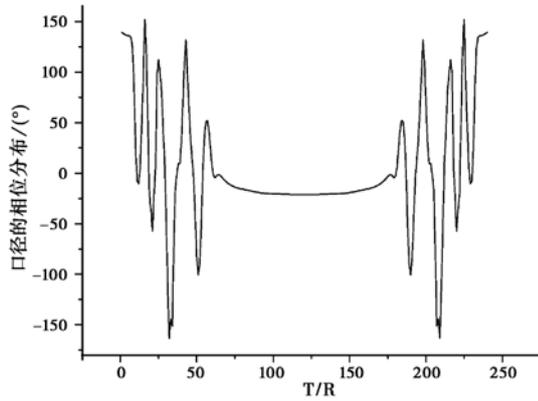
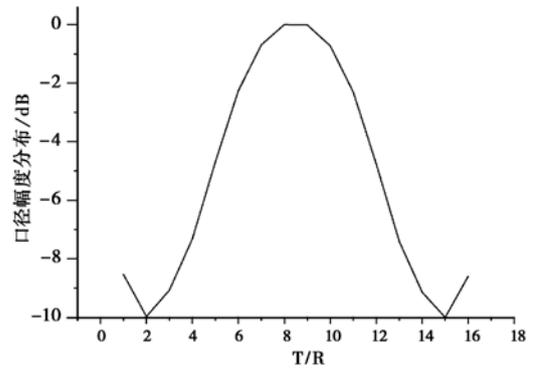
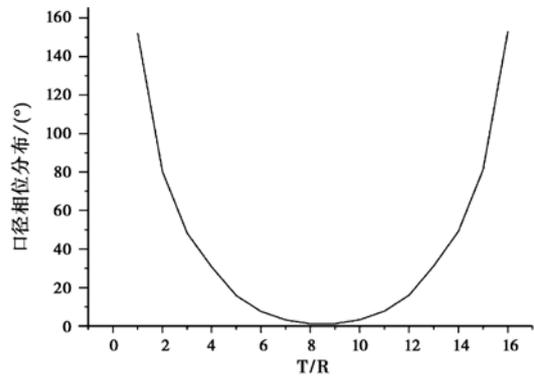


图 5 发射模式下的口径相位分布

向图与优化的方向图吻合得很好。图 7 是口径分布,图 7(a)是口径的幅度分布,在 $[-10, 0]$ dB 内,图 7(b)是口径的相位分布。

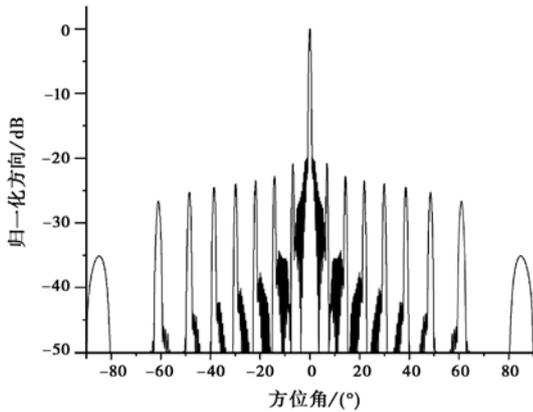


(a) 口径幅度分布

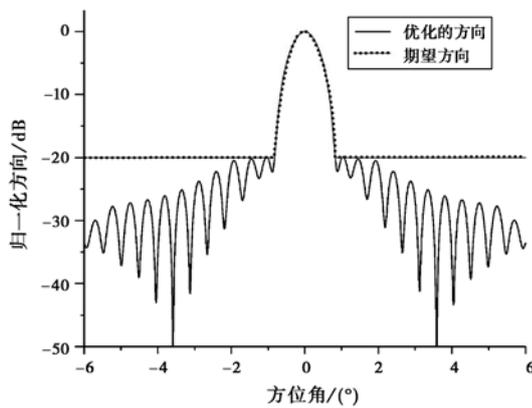


(b) 口径相位分布

图 7 接收模式下口径分布



(a) 全国范围的方向



(b) 局部范围的方向

图 6 方位方向图

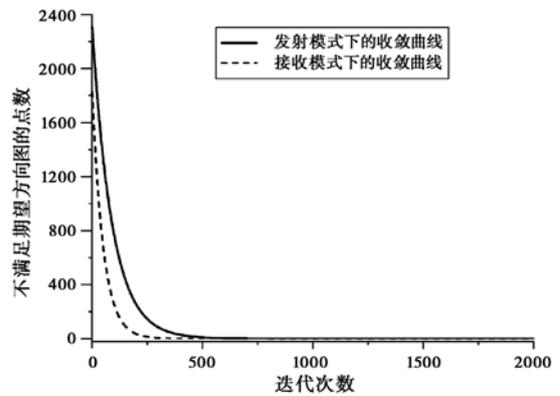


图 8 算法的收敛性

图 8 表示了该方法在以上两个例子的收敛性。可以看出:发射的方向图和接收的方向图分别在 500 步和 300 步的时候,已经收敛;接收模式比发射模式收敛更快,是因为接收模式下幅度也可优化。

3.2 算法分析与比较

文章中的算法利用 FFT 直接对方向图进行优化,并且操作简单。在 CPU 为 T7250,内存为 2 G 的电脑上,用 matlab 计算 256 点的 FFT 只需 45

经过大量的仿真,得出波束展宽两倍到三倍最困难。而文章的方法分别对发射和接收模式进行了仿真,得出了很好的结果。而且从图 5 和图 7 可以看出口径分布很平滑,可以用于工程实现。此方法已经用在了多个项目中。

μs , 512 点的 FFT 需要 $54 \mu\text{s}$, 1024 点的 FFT 需要 $81 \mu\text{s}$. 而一般的优化方法(如:遗传算法^[5-9], 最小二乘算法)操作复杂, 因此, 其速度难以达到文章中的方法。从上面的比较和分析可看出: 基于 FFT 的方向图的综合方法, 具有优化时间短的优点。

4. 结 论

该文提出了一种快速的星载 SAR 的波束优化算法, 并且在发射模式下用相位加权实现主瓣的赋形, 和模糊区的压制, 在接收模式下用幅度和相位加权实现主瓣的赋形。两个例子都得到了令人满意的结果, 并且计算时间短, 可以看出这种方法, 具有优化时间短和操作简单等优点, 具有很好的工程实用价值。

参考文献

- [1] COMISSO M, VESCOVO R. Fast iterative method of power synthesis for antenna arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(6): 1952-1962.
- [2] AGHASI A, AMINDAVAR H, MILLER E L, et al. Flat-top footprint pattern synthesis through the design of arbitrary planar-shaped apertures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(8): 2539-2552.
- [3] 李建新. 阵列部分单元相位加权波瓣综合[J]. 电波科学学报, 2001, 16(4): 433-436.
LI Jianxin. Array part phase-only weighting method for pattern synthesis[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(4): 433-436. (in Chinese)
- [4] 盛严慈, 金荣洪. 基于方向图拓展和 FFT 的阵列快速综合法[J]. 电波科学学报, 2003, 18(5): 540-544.
SHENG Yanci, JIN Ronghong. A speedy array pattern synthesis method based on pattern expansion and FFT [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5): 540-544. (in Chinese)
- [5] 王玲玲, 方大纲. 运用遗传算法结合 FFT 进行多单元失效阵列校准 [J]. 电波科学学报, 2005, 20(5): 561-565.
WANG Lingling, FANG Dagang. Combination of genetic algorithm (GA) and fast Fourier transform (FFT) for array failure correction [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(5): 561-565. (in Chinese)
- [6] 张 杨, 邓云凯. 基于遗传算法的星载合成孔径雷达天线方向图与模糊综合[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(8): 1472-1475.
ZHANG Yang, DENG Yunkai. Antenna pattern synthesis for ambiguity depressing in spaceborne SAR systems based on genetic algorithms [J]. Journal of Electronics & Information, 2006, 28(8): 1472-1475. (in Chinese)
- [7] SEONG H S, EOM S Y, JEON S I, et al. Automatic phase correction of phased array antennas by a genetic algorithm [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2008, 56(8): 2751-2754.
- [8] MARCANO D, DURAN F. Synthesis of antenna arrays using genetic algorithms [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42(3): 12-20.
- [9] 魏忠伟, 高火涛, 柯亨玉. 改进遗传算法对高频宽带加载天线的优化设计[J]. 电波科学学报, 2004, 19(3): 343-347.
WEI Zhongwei, GAO Huotao, KE Hengyu. Optimization design of high frequency broadband loaded antennas using an improved genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(3): 343-347. (in Chinese)
- [10] 李建新, 陈 瑞. 基于 FFT 平面相控阵天线方向图快速计算[J]. 微波学报, 2009, 25(6): 12-17.
LI Jianxin, CHEN Rui. Fast computation of planar phased array pattern based on FFT [J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(6): 12-17. (in Chinese)

作者简介



石 力 (1983—), 男, 四川人, 中国科学院电子学研究所博士生, 以阵列天线, 波束赋形, 优化算法和系统优化为研究方向。



孙慧峰 (1979—), 男, 河南人, 中国科学院电子学研究所在职博士生, 长期从事 SAR 天线的研究和设计。



邓云凯 (1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部主任。长期从事 SAR 雷达系统和技术的研究。

A fast beam optimization algorithm of spaceborne SAR

SHI Li^{1,2} SUN Hui-feng^{1,2} DENG Yun-kai¹ AI Jia-qiu^{1,2} LIU Fan^{1,2}

(1. *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract In this paper, a fast beam optimization algorithm for spaceborne Synthetic Aperture Radar(SAR) is proposed. By using this algorithm, the beam of spaceborne SAR antenna is optimized, and the ambiguity areas are depressed. Firstly, the complex value of the array pattern is obtained by using an inverse Fast Fourier transform(IFFT). Then compared to the desired pattern, all the values of the pattern exceeding the desired pattern are replaced by the values of the desired pattern. Repeat the above operation until the array pattern satisfies the pattern requirements. Compared with the conventional methods, the proposed algorithm needs no complicated operation. Therefore, it provides significant improvements in terms of computational speed and optimization time. Two examples are presented to demonstrate the high efficiency and practicality of the method.

Key words FFT; array antennas; beam optimization design; active phased array