

文章编号: 2095-4980(2021)01-0075-05

平面相控阵天线波束控制技术

金东勇^{1,2}, 陈俊霞³, 李艳华⁴

(1.中国电子科技集团公司 第三十八研究所, 安徽 合肥 230031; 2.孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230088;
3.陆军炮兵防空兵学院, 安徽 合肥 230031; 4.安徽工商职业学院, 安徽 合肥 230041)

摘要: 以平面相控阵天线为研究对象, 在给出阵面天线方向图函数模型的基础上, 详细描述了波控码的计算方法; 分析了波束控制的系统架构, 提出了查表法与分布式计算相结合的波控码计算方法, 阐述了其软件处理流程, 并与传统方法对比分析了该方法的技术优势。通过对阵面天线方向图的仿真分析, 该方法可以控制波束指向, 实现一维扫描与二维扫描、单向扫描与全向扫描, 并具有很好的控制精确度。对波控系统的设计可以推广到其他阵列天线模型上。

关键词: 平面相控阵; 天线方向图; 波控码; 波束控制; 查表法; 分布式计算

中图分类号: TN958

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019433

Beam-steering of planar phased array antenna

JIN Dongyong^{1,2}, CHEN Junxia³, LI Yanhua⁴

(1.The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui 230031, China; 2.Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, Hefei Anhui 230088, China; 3.PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei Anhui 230031, China;
4.Anhui Business Vocational College, Hefei Anhui 230041, China)

Abstract: Taking planar phased array antenna as the research object, the calculation method of the beam-control code is described in detail on the basis of the function model of the front antenna pattern. The architecture of the beam-steering system is analyzed. The calculation method of beam controlling code is put forward by combining lookup table method with distributed computing. The software processing flow is expounded, and the technical advantages of this method are compared with the traditional methods. The simulation analysis of the antenna pattern shows that the method can control beam pointing and realize one-dimensional scanning and two-dimensional scanning, one-way scanning and omnidirectional scanning with good accuracy. This work has important guiding significance for the design of the beam controlling system, and can be extended to other array antenna models.

Keywords: planar phased array; antenna pattern; beam-control code; beam-steering; lookup table method; distributed computing

相控阵天线作为相控阵雷达的核心组成单元, 其波束扫描由波束控制系统(以下简称波控系统)控制。相控阵雷达与机械扫描雷达相比, 具有很大的灵活性, 数据更新周期也由秒或十秒级上升为毫秒或微秒级, 在发现高机动目标时, 具有极大的优势。

平面相控阵(以下简称阵面)天线由多个天线单元以面阵的方式排列组成。随着相控阵雷达技术的发展, 阵面天线也从几十个单元组成的单面阵发展到数万个单元组成的多面阵, 这对波控系统提出了新的要求和挑战。为了实现天线波束在空间的无惯性扫描^[1], 需要波控系统提高波控码的计算效率和传输速度, 以缩短布相时间。波控码的传统计算采用波控计算机实时、集中计算, 这种方式硬件成本高, 占用计算资源和传输带宽。

本文采用查表法与分布式计算^[2]相结合, 根据多级波控的系统架构, 分配波控码的存储和计算资源, 具有成本低、计算速度快、节省数据传输带宽^[3]的优点。

收稿日期: 2019-11-04; 修回日期: 2019-11-13

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究重点项目(KJ2019A1168)

作者简介: 金东勇(1981-), 男, 硕士, 主要研究方向为相控阵雷达波束控制与波束调度。email:jdy_111@163.com

1 平面相控阵天线方向图模型

以天线单元均匀布置的矩形阵面为研究对象,阵面的天线单元布置及其坐标关系如图 1 所示。整个阵面在 YOZ 平面上,共有 $M \times N$ 个天线单元,沿 Z 轴的天线单元间距为 d_1 ,沿 Y 轴的天线单元间距为 d_2 。目标所在方向以方位角 φ 和俯仰角^[4] θ 表示,方位角 φ 为目标方向在 XOY 平面上的投影与 X 轴的夹角,俯仰角 θ 为目标方向与 XOY 平面的夹角。

在线性传播媒介中,根据电磁场方程的线性叠加定律^[5],得到阵面的方向图函数为:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} a_{ik} e^{j[i(\frac{2\pi}{\lambda}d_1 \sin\theta - \beta) + k(\frac{2\pi}{\lambda}d_2 \cos\theta \sin\varphi - \alpha)]} \quad (1)$$

式中: α 和 β 为阵内相位差; λ 为雷达电磁波波长; k, i 分别为该天线单元的行列序号; a_{ik} 为第 (i, k) 天线单元的幅度加权系数^[6]。

为了在 (θ_0, φ_0) 方向上获得波束最大值, α, β 应为:

$$\begin{cases} \beta = \frac{2\pi}{\lambda} d_1 \sin\theta \\ \alpha = \frac{2\pi}{\lambda} d_2 \cos\theta_0 \times \sin\varphi_0 \end{cases} \quad (2)$$

按照式(2)改变阵内相位差^[7] α 和 β , 即可改变天线最大波束的指向, 实现天线波束的相控扫描。

当天线口径均匀分布(以下简称等幅分布^[8])时, 阵面方向图函数可表示为:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{i=0}^{M-1} e^{ji(\frac{2\pi}{\lambda}d_1 \sin\theta - \beta)} \sum_{k=0}^{N-1} e^{jk(\frac{2\pi}{\lambda}d_2 \cos\theta \sin\varphi - \alpha)} \quad (3)$$

归一化后的方向图函数为:

$$F(\theta, \varphi) = F_1(\theta) \times F_2(\theta, \varphi) \quad (4)$$

$$\text{式中: } F_1(\theta) = \frac{\sin \frac{M}{2} (\frac{2\pi}{\lambda} d_1 \sin\theta - \beta)}{M \sin \frac{1}{2} (\frac{2\pi}{\lambda} d_1 \sin\theta - \beta)} \approx \frac{\sin \frac{M}{2} (\frac{2\pi}{\lambda} d_1 \sin\theta - \beta)}{\frac{M}{2} (\frac{2\pi}{\lambda} d_1 \sin\theta - \beta)}; F_2(\theta, \varphi) = \frac{\sin \frac{N}{2} (\frac{2\pi}{\lambda} d_2 \cos\theta \sin\varphi - \alpha)}{N \sin \frac{1}{2} (\frac{2\pi}{\lambda} d_2 \cos\theta \sin\varphi - \alpha)} \approx \frac{\sin \frac{N}{2} (\frac{2\pi}{\lambda} d_2 \cos\theta \sin\varphi - \alpha)}{\frac{N}{2} (\frac{2\pi}{\lambda} d_2 \cos\theta \sin\varphi - \alpha)}.$$

2 波束控制系统

2.1 波控码计算方法

波控系统的基本功能是根据要求的天线波束指向, 计算每个单元的波控码, 提供单元移相器所需的控制信号。

根据相邻单元之间信号的“空间相位差”与移相器提供的“阵内相位差”相等的原理, 结合式(2), 可求出阵内第 (i, k) 单元的波控码 $C(i, k)$ 。

$$C(i, k) = i\alpha(\theta, \varphi) + k\beta(\theta) + A_{i,k} + \alpha_0 \quad (5)$$

式中: $\beta(\theta)$ 和 $\alpha(\theta, \varphi)$ 分别为阵面的行、列移相基码^[9]; $A_{i,k}$ 为该天线单元的补偿值; α_0 为初始相位值。

当数字式移相器的计算位数为 k 时, 与波控码 $C(i, k)$ 为“1”时相对应的最小计算相移量^[10]为 $\Delta_{\min} = 2\pi/2^k$, 根据式(2)可得:

$$\beta(\theta) = \frac{d_1}{\lambda} 2^k \sin\theta, \quad \alpha(\theta, \varphi) = \frac{d_2}{\lambda} 2^k \cos\theta \times \sin\varphi \quad (6)$$

给出波束指向的方位角 φ 和俯仰角 θ 后, 按照式(5)和式(6)计算波控码。

2.2 系统架构

随着相控阵技术的发展, 天线阵面从几十个单元组成的单阵面发展为成千上万个单元组成的多阵面, 波控系统也从单级系统发展为多级系统, 本文以两级波控系统为例阐述系统架构, 由两级波控系统可以方便地类推至多级波控系统。

两级波控系统架构如图 2 所示, 每个一级波控可以负载若干个二级波控, 每个二级波控可以控制若干个天线

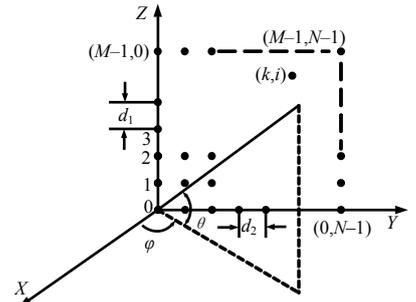


Fig.1 Planar phased array antenna
图 1 平面相控阵天线

单元, 天线单元、二级波控、一级波控构成树状拓扑结构^[11]。由于采用查表与分布式计算相结合计算波控码, 有效节省了数据传输带宽, 本系统所有设备之间采用同步串口 RS422 通信方式即可满足要求。

模块设计时要考虑功能单一化要求, 以达到硬件可扩充、可拼接的目的, 形成标准化、系列化、组合化的系统设计规范。

2.3 软件处理流程

查表和计算分别在一级波控、二级波控的 FPGA 上完成, 统筹考虑运算量与系统资源, 合理分配执行任务。计算波控码需要知道方位角 φ 、俯仰角 θ 和波长 λ , λ 用 c/f 计算, c 为光速, f 为雷达信号频率, d_1, d_2 取同样的值, 即阵内行列方向天线单元的间距相等, 用 d 表示。

计算时, 进行分块计算, 提取共用算子, 把 $\sin\theta, \cos\theta, \sin\varphi, d \times f/c$ 分别制成 4 个内存表, θ, φ, f 根据雷达性能要求确定取值范围。设定 θ, φ 以 0.3° 步进变化, 在取值范围内计算出所有样本的 $\sin\theta, \cos\theta, \sin\varphi$; f 以 1 MHz 步进变化, 在取值范围内计算出所有样本的 $d \times f/c$ 。然后把 4 个数据表以合理的地址排序存储在一级波控的 flash 内, 掉电后数据不会丢失。

系统上电后一级波控首先把 $\sin\theta, \cos\theta, \sin\varphi, d \times f/c$ 4 个数据表从 flash 中读取到 RAM 空间, 即所用的查找表。一级波控接收到波控参数, 解析出 θ, φ, f , 查表得到 $\sin\theta, \cos\theta, \sin\varphi, d \times f/c$, 然后按照式(6)做乘法运算得到 α, β , 再把 α, β 发送给二级波控, 二级波控按照式(5)做乘加运算得到所控制的天线单元的波控码 $C(i, k)$ 。假设阵面共有 $M \times N$

个天线单元, 则第 (i, k) 单元的“阵内相位”矩阵^[12]为

$$\begin{bmatrix} C(0,0) & C(0,1) & \cdots & \cdots & C(0,N-1) \\ C(1,0) & C(1,1) & \cdots & \cdots & C(1,N-1) \\ C(2,0) & C(2,1) & \cdots & \cdots & C(2,N-1) \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ C(M-1,0) & C(M-1,1) & \cdots & \cdots & C(M-1,N-1) \end{bmatrix}, \text{ 最后二级波}$$

控向天线单元移相器打入波控码, 阵面天线的波束即指向 θ, φ 方向。

3 仿真与分析

以图 1 所示等幅分布的阵面为仿真模型, 使用式(4)~(6)归一化后的天线方向图函数, 通过 Matlab 软件可仿真得到阵面天线方向图。阵面参数取值为: M 为 50, N 为 30, d_1, d_2 都为 0.2 m, λ 为 0.5 m, 方位角 φ 和俯仰角 θ 的扫描范围都为 $-\pi/3 \sim \pi/3$, 采用计算位数 k 为 6 的数字式移相器。

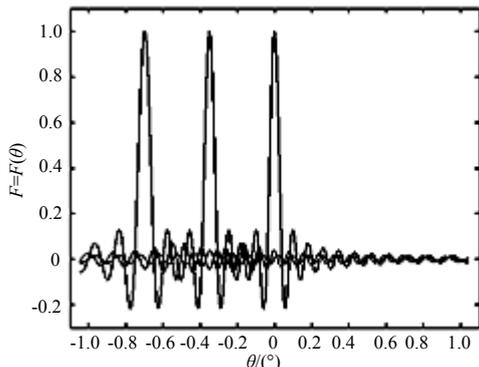


Fig.3 One dimensional scanning graph in pitching direction
图 3 俯仰向一维扫描方向图

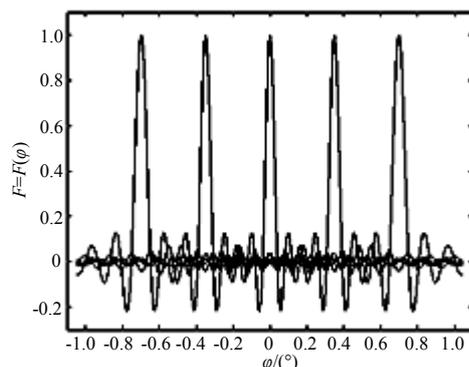


Fig.4 One dimensional scanning graph in azimuth direction
图 4 方位向一维扫描方向图

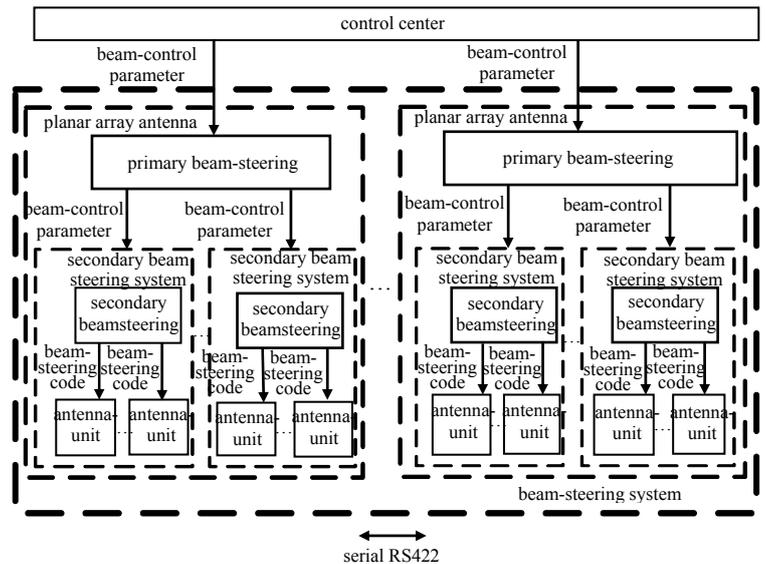


Fig.2 Architecture of beam-steering system
图 2 波控系统架构图

1) 当 $\varphi=\varphi_0=0^\circ$ 时, 天线波束在俯仰向进行一维扫描, 即在 XOZ 平面内扫描, θ_0 在扫描范围内取不同值时, 仿真得到波束扫描方向图, 如图 3 所示。

2) 当 $\theta=\theta_0=0^\circ$ 时, 天线波束在方位向进行一维扫描, 即在 XOY 平面内扫描, φ_0 在扫描范围内取不同值时, 仿真得到波束扫描方向图如图 4 所示。

3) 当方位角 φ 和俯仰角 θ 都不为 0° 时, 天线波束在方位向和俯仰向进行二维扫描, φ_0 和 θ_0 取值不变时, 在 (θ_0, φ_0) 方向上出现一个不变的波束, 仿真得到的波束方向图如图 5 所示。

4) 天线波束二维扫描时, φ_0 取一个不为 0° 的固定值, θ_0 在扫描范围内变化时, 则波束在 φ_0 的切面上做俯仰向扫描, 仿真得到的波束扫描方向图如图 6 所示。

5) 天线波束二维扫描时, θ_0 取一个不为 0° 的固定值, φ_0 在扫描范围内变化时, 则波束在 θ_0 的切面上做方位向扫描, 仿真得到的波束扫描方向图如图 7 所示。

6) 天线波束二维扫描时, θ_0 和 φ_0 在扫描范围内都变化时, 则波束进行二维全向扫描, 仿真得到的波束扫描方向图如图 8 所示。

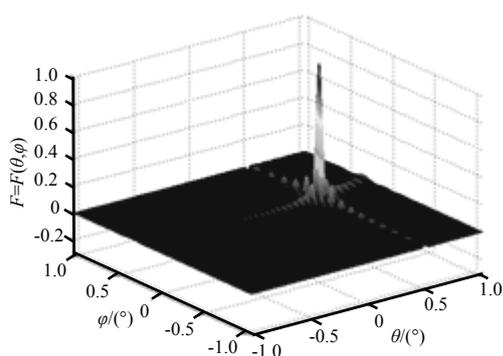


Fig.5 One beam graph in single direction
图 5 单一指向波束方向图

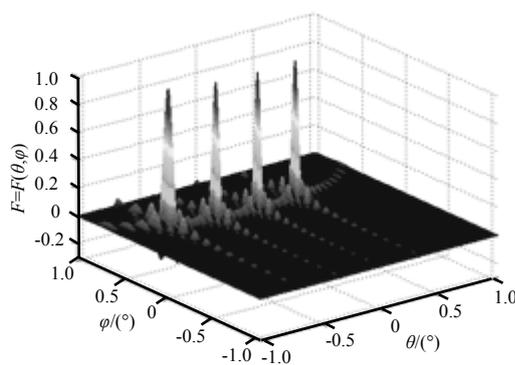


Fig.6 Two dimensional scanning graph in pitching direction
图 6 俯仰向二维扫描方向图

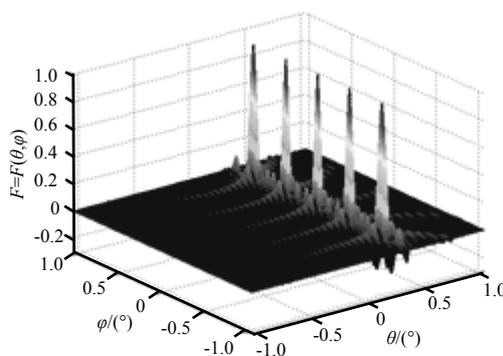


Fig.7 Two dimensional scanning graph in azimuth direction
图 7 方位向二维扫描方向图

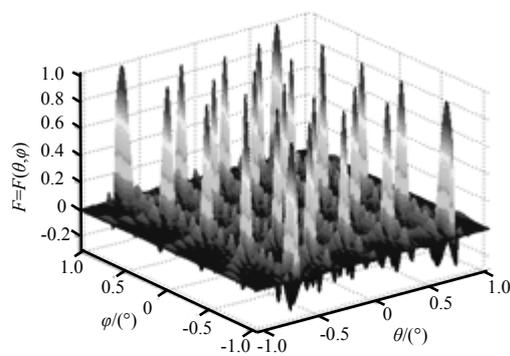


Fig.8 Two dimensional scanning graph in all direction
图 8 二维全向扫描方向图

从以上天线方向图可以看出, θ_0 和 φ_0 变化时, 波束指向也随着变化, 但波束形状保持不变, 即可以通过改变波控码, 控制波束指向, 实现天线波束的相控扫描。比较图 3~图 8 可以看出, 随着 θ_0 和 φ_0 取值不同, 波束可以实现一维扫描与二维扫描, 二维扫描时又可以实现单向扫描与全向扫描, 验证了等幅分布阵面方向图函数的可分离性^[13]。

数字式移相器计算位数 $k=6$ 时, 理论计算得到最小计算相移量 $\Delta_{\min}=5.625^\circ$ 。天线波束二维全向扫描时, $\beta(\theta)$ 和 $\alpha(\theta, \varphi)$ 以 1 步进增加, 从仿真图可以看出波束指向在俯仰向和方位向以 5.6 步进增加, 步进精确度与理论计算相符, 该波束控制方法具有很好的控制精确度。

相控阵雷达在实际工作中, 天线波束并不像仿真图显示的一样进行遍历扫描, 而是根据工作模式的不同(如搜索、跟踪等模式), 确定扫描方式。由信号处理系统给出下一时刻的波束指向, 波控系统根据指向角计算波控码, 并把波控码送入天线单元移相器, 控制波束指向预定的方向。通过控制天线单元移相器波控码的更新频率, 实现对波束扫描速度的控制。

4 结论

本文提出了一种通过天线方向图研究波控系统的方法,以归一化后的天线方向图函数为模型,忽略了幅度加权因子,适用于等幅分布阵面波控系统的前期论证。天线方向图增加幅度加权因子后,该方法同样适用于非等幅分布阵面和共形阵列天线波控系统的研究。

创新性提出查表与分布式计算相结合的方法计算波控码,有效缩短了波控系统的响应时间,提高波束扫描效率,并具有系统结构简单,节省数据传输带宽,成本低的优点。

参考文献:

- [1] 李欣伟,张平,朱磊. 一种基于相位扫描的机载 SAR 运动补偿算法与实现[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010,27(1):70-75. (LI Xinwei,ZHANG Ping,ZHU Lei. An airborne SAR motion compensation algorithm based on array scanning and its implementation[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2010,27(1):70-75.)
- [2] 王楠,许蕴山,夏海宝,等. 一种相控阵雷达跟踪波束优化控制方法[J]. 导航定位学报, 2019,7(1):48-53. (WANG Nan, XU Yunshan,XIA Haibao,et al. A method of beam optimal control for ESA radar target tracking[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019,7(1):48-53.)
- [3] 夏勇,张浩,李晓娟,等. 二次雷达波束控制系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(3):266-269. (XIA Yong, ZHANG Hao,LI Xiaojuan,et al. Design of beam steering system for secondary surveillance radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(3):266-269.)
- [4] WEN Qiuqiu,LU Tianyu,XIA Qunli,et al. Beam-pointing error compensation method of phased array radar seeker with phantom-bit technology[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017,30(3):1217-1230.
- [5] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1994. (ZHANG Guangyi. Phased array radar system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994.)
- [6] SHENG Chuan,ZHANG Yongshun,LU Wenlong,et al. Method to reconnoiter pulse amplitude train for phased array radar based on Hausdorff distance[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017,28(6):1089-1097.
- [7] 樊会涛,杨军,朱学平. 相控阵雷达导引头波束稳定技术研究[J]. 航空学报, 2013,34(2):387-392. (FAN Huitao,YANG Jun,ZHU Xueping. Research on beam stabilization technology of phased array radar seeker[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(2):387-392.)
- [8] 蒋彦婷,周荫清,徐华平. 机载混合模式 SAR 波束指向控制对图像质量的影响[J]. 电子与信息学报, 2008,30(2):335-338. (JIANG Yanting,ZHOU Yinping,XU Huaping. Effect of air hybrid mode SAR beam point steering on the image quality[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(2):335-338.)
- [9] 肖文光,姚伯栋. 基于 FPGA 的抗辐照加固波控单元设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(3):541-545. (XIAO Wenguang,YAO Bodong. Design of anti-radiation hardened beam-steering units based on FPGAs[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(3):541-545.)
- [10] 高云珠,王晟达. 相控阵雷达波控系统研究[J]. 微计算机信息, 2008,24(10):81-83. (GAO Yunzhu,WANG Shengda. Research of beam steering for phased array radar[J]. Microcomputer Information, 2008,24(10):81-83.)
- [11] 常慧玲,马莉,陈琛. 波控系统环境试验自动控制台设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2011,32(5):1858-1861. (CHANG Huiling,MA Li,CHEN Chen. Design and realize on auto control platform of beam steering system environment test[J]. Computer Engineering and Design, 2011,32(5):1858-1861.)
- [12] 毛永飞,高文军,韩运忠. 相控阵体制 SAR 系统的误差建模与补偿方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):51-56. (MAO Yongfei,GAO Wenjun,HAN Yunzhong. Error modeling and compensation for phased array antenna SAR system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):51-56.)
- [13] ZHOU Yan,XIA Zhixun,LUO Zhenbing,et al. Effect of three-electrode plasma synthetic jet actuator on shockwave control[J]. Science China Technological Sciences, 2017,60(1):146-152.