doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.12.010

引用格式:刘恒,赵宏伟,李维梅,等.平面六边形稀疏阵列天线的优化[J].电讯技术,2015,55(12):1365-1370.[LIU Heng,ZHAO Hongwei,LI Weimei,LIU Bo. Optimization of Planar Hexagonal Thinned Array Antenna[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(12):1365-1370.]

平面六边形稀疏阵列天线的优化*

刘 恒**,赵宏伟,李维梅,刘 波

(西安空间无线电技术研究所,西安 710100)

摘 要:针对标准的差分进化算法只能处理连续空间的优化问题,提出了一种基于取整策略的差分进化算法。该方法只需要对优化变量进行四舍五入取整,就能够把标准差分进化算法用于稀疏阵列 天线方向图优化。将取整策略的差分进化算法应用到六边形平面稀疏天线阵的布阵设计。为了计 算六边形阵列天线的方向图,提出在口径中添加虚拟单元的计算模型,把六边形阵列转化为可以实 现二维快速傅里叶变换的矩形阵列。以改善阵列峰值副瓣电平为目的进行仿真试验,结果表明,优 化后的稀疏天线阵峰值旁瓣电平与采用遗传算法相比改善了4.5~5.1 dB,且具有计算速度快、稳定 性好的优点。

关键词:阵列夭线;稀疏阵列;差分进化算法;快速傅里叶变换 中图分类号:TN821 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2015)12-1365-06

Optimization of Planar Hexagonal Thinned Array Antenna

LIU Heng, ZHAO Hongwei, LI Weimei, LIU Bo

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: For the problem that the standard differential evolution (DE) can only be suited for the continuous optimization, a rounding strategy DE is proposed for the discrete optimization problem. The method can deal with the optimization design of thinned array antenna by taking rounding the parameters vector. Then the proposed method is applied to design a low side lobe hexagonal planar thinned array. Virtual elements are added into the array aperture for translating the hexagonal array to rectangular, and a fast Fourier transform is employed to speed up the calculation of hexagonal array factor. The simulation results show that the peak sidelode level of the hexagonal thinned array using the proposed method is reduced by $4.5 \sim 5.1$ dB than that of the thinned array using genetic algorithm, and also the method has the advantage of high computation speed and stability.

Key words: array antenna; thinned array; differential evolution; fast Fourier transform

1 引 言

稀疏相控阵天线^[1]是指从规则排布的均匀相 控阵中按照一定的比例剔除掉部分单元,或者将这 些单元连接到匹配负载上,既可以减少阵列天线成 本和重量,还可以获得与满阵排布相当的窄波束。 当单元均匀激励时,稀疏阵列天线可以获得比满阵 布置更低的副瓣电平。由于稀疏阵列天线不需要幅 相调整的放大器和移相器等器件,具有结构简单和 低成本等优点,已成功应用在抗环境干扰的卫星接 收天线、高频地面雷达和射电天线学中的干涉阵等

 ^{*} 收稿日期:2015-05-13;修回日期:2015-08-10 Received date:2015-05-13;Revised date:2015-08-10 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61201089)
 Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61201089)

^{**} 通讯作者:liuheng@ mail. nankai. edu. cn Corresponding author:liuheng@ mail. nankai. edu. cn

差分进化算法(Differential Evolution, DE)是由 Storn 和 Price 两位学者提出^[9]的,由于其高效、快 速、随机并行搜索方式,且操作简单、搜索能力强等 原因,已经在阵列天线综合等电磁优化问题中得到 了广泛的应用^[10-11]。杨仕文教授^[12]在时间调制天 线阵列和幅度激励的方向图综合中应用 DE 算法进 行优化,取得了比遗传算法更快的收敛速度。然而, 阵列天线的稀疏布阵是一个离散的 0-1 规划问题, 对稀疏阵列天线方向图的综合大多数采用支持离散 编码的智能优化算法。例如,文献[5]采用布尔代 数体系的布尔 DE 算法,其变异算子可以在二进制 编码 0-1 规划问题直接求解。文献 [13] 提出了将 实值变量分别量化,然后组成所需要的二进制序列 的二进制 DE 算法。由于布尔 DE 和二进制 DE 算 法对变异算子进行了修改,无法应用于标准 DE 算 法基础上大量改进的算法。本文将标准 DE 算法与 取整策略相结合,使稀疏阵列天线的综合可以直接 用标准 DE 算法进行处理。

由于在等幅激励时近似圆形的六边形平面阵列 能够获得相对低的峰值副瓣电平(Peak Sidelobe Level,PSLL),且相同单元间距下六边形阵列扫描过 程中出现栅瓣时的扫描角度更大,因此六边形平面 天线阵被广泛应用在通信和雷达中^[14]。本文应用 取整策略的 DE 算法对工程上广泛应用的正三角形 排列的六边形平面天线阵(1027 个单元)进行稀疏 布阵优化,以降低阵列天线的峰值副瓣电平。为了 快速地计算六边形平面阵列的辐射方向图,通过添 加虚拟单元把六边形阵列转化为矩形阵列,六边形 阵的阵因子就可以通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT)进行计算。为了对阵列单元的 优化变量进行降维,以对称处理的方式把独立单元 降低了 90%。仿真实验得到了满意的结果,说明了 此方法在工程应用中的有效性和可行性。

2 天线阵列模型

2.1 六边形阵列天线方向图

六边形平面阵列天线的几何结构如图1所示, 其天线单元按等边三角形排列,由若干个同心六边 形环阵环绕一个位于中心的天线单元所组成。文献 [2]根据圆环天线阵的远场表示式,通过阵列叠加 原理计算六边形阵列天线的方向图。对于一个由L 个同心六边形环阵组成的六边形平面天线,其第一 行的单元数为L+1个;随着行数的增加,每行的单 元数依次增一个,到L+1行的单元数增加到最多的 2L+1个;再随着行数继续增加,每行的单元数则依 次减少一个,到2L+1行的单元数减少到L+1个,每 行不等数量但等间距的直线阵在纵向交替紧密排 布。本文利用六边形阵列天线的这一结构提出一种 新的六边形阵列辐射方向图的计算方法。



图 1 六边形平面阵列天线结构图 Fig. 1 Structure of a hexagon planar array antenna

由于六边形平面阵列的每行在 y 方向是交替排 布的,如果通过在每行的单元中间添加一个虚拟单 元,这样就把六边形平面阵列变换为矩形栅格的平 面阵列。每行沿 x 轴方向间距 d_x = 0.5d,每列沿 y 轴方向间距 d_y = 0.5d·tan60°,d 为正三角形排列的 单元间距。根据六边形平面阵列的结构和添加的虚 拟单元的位置可知,对于一个由 L 个同心六边形环 阵通过在每一行单元中间添加虚拟单元变化为一个 2L+1 行 4L+1 列的矩形栅格平面阵,由阵列天线理 论可知,在不考虑互耦的情况下,辐射单元为理想点 源,六边形阵列方向图满足乘积定理可以表示为

$$\operatorname{AF}(\theta,\varphi) = \sum_{m=1}^{2L+1} \sum_{n=1}^{4L+1} A_{mn} e^{ik[(m-1)d_x \sin\theta\cos\varphi + (n-1)d_y \sin\theta\sin\varphi]} \circ (1)$$

式中,L为同心六边形环阵的数量,k为波数, θ 、 φ 分别为球坐标系的下俯仰角和方位角, A_{mn} 是第(m,n) 个单元激励幅度。对于矩阵A与六边形阵列不匹 配的点,如添加的虚拟单元和位于六边形阵列孔径 外的点,其激励幅度设置 $A_{mn} = 0$ 。那些与阵列匹配 的点,在稀疏阵优化过程中, $A_{mn} = 1$ 表示单元在工 作;A_m=0表示单元被剔除。

根据六边形阵列天线的对称性,对称轴上的单 元有6个对称单元,非对称轴上的单元有12个对称 单元。如果一个单元在优化中被稀疏剔除,与其相 对称的所有单元都剔除,则六边形天线阵的独立单 元位于图1中y轴和p标记的30°扇形区内的单元。 式(2)给出一个六边形天线阵(L个同心六边形环 阵)的独立单元数D的计算公式.

$$D = 1 + \sum_{l=1}^{L} \left[\operatorname{int}(\frac{l}{2} + 1) \right]_{\circ}$$
 (2)

式中, int(·) 为向下取整函数。

2.2 利用 FFT 计算阵列天线方向图

在进化过程中,评估个体的优劣需要根据采样 点反复计算方向图函数,如果能够减少方向图的计 算时间就能降低评估个体适应度的时间,从而提高 算法的优化速度。设一个由理想点源组成的阵列, 单元间距沿 x 轴方向为 d_x, y 轴方向为 d_y的 M×N 元 平面阵列天线,在不考虑互耦影响的情况下,阵因子 可以表示为

$$AF(u,v) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} A_{mn} e^{jk[(m-1)d_{x}u + (n-1)d_{y}v]}$$
(3)

式中, $k=2\pi/\lambda$, λ 为自由空间波长, A_{mn} 是第(m,n) 个单元激励幅度, $u=\sin\theta\cos\varphi$, $v=\sin\theta\sin\varphi$ 是方向余 弦, θ , φ 分别为球坐标系的下俯仰角和方位角。令p= $Mkd_xu/2\pi+1$, $q=Nkd_yv/2\pi+1$,则式(3)变换为

$$AF(p,q) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} A_{mn} e^{j\frac{2\pi}{M}(m-1)(p-1)} e^{j\frac{2\pi}{N}(n-1)(q-1)} (q)$$

由式(3)可以看出阵因子 AF(u,v)与单元激励 A 之间存在 FFT 关系,这样根据具体的问题,将(θ , φ)域的方向图特性映射到(p,q)域中,就可以在(p, q)进行优化。由 $u=\sin\theta\cos\varphi$ 、 $v=\sin\theta\sin\varphi$ 可得 u^2+v^2 $=\sin^2\theta \leq 1$,即方向余弦 u,v 坐标系下,可见空间为 一圆形区域。

2.3 方向图计算速度分析

在方向图采样点很多的情况下,采用阵列叠加 原理需要很长时间计算阵因子,甚至导致计算无法 完成。为了减少优化计算量,通常是在 φ=0°和 φ= 90°两个主面进行方向图采样,结果可能导致其他 φ 面的方向图不理想。本文对单元激励做 FFT 来计 算阵因子,具有计算速度极快的优点。表 1 列出了 使用阵列叠加原理和 FFT 在独立运行 20 次,计算 由 1027 个单元组成的六边形阵列方向图所需要的 平均时间。所用计算机处理器为 Q8300,内存为 2 GB。可以看出与阵列叠加原理比较,FFT 计算二维 阵列方向图具有计算时间极短的优点。

表1 计算阵列方向图的平均时间

Table 1 Average time of computing the array pattern						
方向图采样点	平均时间/s					
	阵列叠加原理	FFT				
256×256	51.94	0.100 9				
512×512	210.94	0.311 2				

3 基于取整策略的差分进化算法

由于稀疏阵列天线的激励幅值只能取0和1. 在优化过程中如果能够处理单元激励幅度的离散问 题,就可以采用标准 DE 算法进行优化。本文将标 准 DE 算法与取整策略相结合,差分进化变量的搜 索区间在各维坐标上设为[0,1],通过对优化变量 进行四舍五入取整,可以使标准 DE 算法对稀疏阵 列方向图进行优化。在六边形稀疏阵天线中,用一 个D维向量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_D)$ 表示一个稀疏阵列天 线的激励状态 A.,,,向量的维数等于需要优化的独 立单元数。六边形阵列天线中心单元的状态用向量 的第一位数表示,第一个六边形环阵的第一个独立 单元用第二位数表示,依次类推如图1中的数字所 示。对每一维变量进行取整,结果为"1"表示与该 独立单元对称的所有单元都在工作,取整后结果为 "0"代表单元都被剔除。为了不影响算法性能,目 标向量的取整只是在适应度函数的计算过程进行。 因此,本文提出的基于取整策略的 DE 算法用于六 边形稀疏阵列天线优化的流程如下。

(1)种群初始化。根据变量的取值范围[0,1], 在上下边界空间尽可能地均匀分布种群数 NP 个目 标向量:

$$\boldsymbol{x}_{i,G} = \operatorname{rand}(1,D)_{\circ} \tag{5}$$

式中, rand(1, D)为 D 维的[0, 1] 区间上的随机数。

(2) 变异。从种群中随机选取 3 个不同目标向 量 $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$,生成变异向量 $v_{i,c} = x_{r_1,c} + F \cdot (x_{r_2,c} - x_{r_3,c})_{\circ}$

(3)交叉。对变异个体 *v_{i,g}*和 *x_{i,g}*进行交叉操 作,产生新的试验向量 *u_{i,g}*=(*u_{1i,g}*,*u_{2i,g}*,…,*u_{Di,g}*)。

$$\iota_{ji,G} = \begin{cases} v_{ji,G}, \text{ if } \operatorname{rand}_{j}(1) \leq CR \text{ or } j = k\\ x_{ii,G}, \text{ otherwise} \end{cases}$$
(6)

式中,k为任意随机整数,以确保至少有一维 $v_{i,c}$ 贡献给实验向量 $u_{i,c}$ 。

(4)计算适应度函数。对目标向量和试验向量 进行取整,按式(7)计算适应度:

fitness($\mathbf{x}_{i,G}$) = $f(\text{round}(\mathbf{x}_{i,G}))_{\circ}$ (7) 式中,round(•)为四舍五入取整。

(5)选择。目标向量与交叉操作后的试验向量 进行竞争,适应度值更优的个体作为进入下一轮 进化。

(6)判断是否满足迭代次数上限或收敛准则, 未满足则转到第2步。

(7)输出最好个体 x_{best} 对应的阵列结构 A_{mn} , 优化结束。

4 稀疏阵列天线的优化实例

本文应用取整策略的 DE 算法对文献[2]中 1027 个单元的六边平面稀疏天线阵列进行优化,单 元为理想点源,间距 $d = \lambda/2$,为了使结果具有对比 性,采用与文献[2]中遗传算法相同的种群数 NP= 200,进化代数 G = 100。我们验证当 FFT 运算采样 点数 K = 256,文献[2]的阵列布置在 $\varphi = 0^{\circ}$ 面的 PSLL=-27.33 dB, $\varphi = 90^{\circ}$ 面的 PSLL = -26.43 dB, 与文献[2]结果 PSLL=-26.4 dB相等,可以认为文 献[2]中的采样点是 256。DE 算法的基本参数采用 文献[15] 推荐的 DE/rand/1,差分因子 F = 0.5,交 叉概率 CR=0.9,为了体现本文方法的稳健性,独立 运行 10 次仿真程序。

4.1 六边形稀疏天线阵优化

本文采用 FFT 计算六边形天线阵列方向图,由 于 FFT 计算的快速性,大大缩小了适应度的评估时 间,峰值副瓣电平在所有 *φ* 平面进行采样计算,适 应度函数定义为

$$f(\boldsymbol{A}) = \text{PSLL}(\boldsymbol{A}) = \max_{u, u \in S} \left| \frac{\text{AF}(\boldsymbol{A})}{\text{FF}_{\text{max}}} \right|_{\circ}$$
(8)

式中,S表示副瓣区域,FFmax是主瓣的峰值。

图 2 给出了取整策略 DE 算法最好、最差单次和 10 次平均收敛曲线。最好阵列的单元数 T = 607,方 向性系数 D = 32.8 dB, $\varphi = 0^{\circ}$ 面的 PSLL = -28.2 dB, $\varphi = 90^{\circ}$ 面的 PSLL = -28.9.3 dB,如表 2 所示,在全 φ 面内的 PSLL = -28.2 dB。与文献[2]中运用遗传算 法对相同的阵列进行优化相比 PSLL 改善了6 dB,单 元数增加了 90 个,最大方向性系数增加了1.4 dB,其 主瓣和副瓣都得到了改善。最差阵列在全 φ 面的 PSLL 相对文献[2]也改善了4.5 dB。



图 2 DE 算法收敛曲线

Fig. 2 Convergence of optimization DE algorithm

表 2 优化结果与文献[2]遗传算法对比

Table 2 Co	mparison	or or op	oumization	results be	etween DE	and GA
算法	<i>₩7.</i> ₩7	单元	PSLL/dB			
	<i>אך א</i> ר	数	$\varphi = 0^{\circ}$	$\varphi = 90^{\circ}$		<i>D/</i> (1D)
本文	最好	607	-28.90	-28.22	-28.22	32.8
	最差	655	-26.82	-26.74	-26.74	32.9
文献[2]	最好	517	-27.33	-26.43	-22.28	31.4

图 3 给出了最好阵列天线阵的远场方向图,其中 图 3(a)为远场方向三维方向图,图 3(b)是 φ=0°和 φ=90°两个截面的方向图。优化得到的最好六边形 稀疏阵列如图 4 所示,阵列中心单元密集,边缘单元 排布比较稀疏,符合稀疏阵列优化的一般规律。



· 1368 ·



图 4 六边形稀疏阵列单元分布图 Fig. 4 Elements distribution in aperture

4.2 六边形稀疏天线阵扫描优化

本小节应用 DE 算法同样对文献[2]中有 1027 个单元的扫描六边形稀疏天线阵进行优化处理,要 求阵列在 60°的圆锥空域进行扫描,则适应度函数 选取为(φ =0°, θ =0°)、(φ =0°, θ =60°)和(φ =90°, θ =60°)3个波位全 φ 平面内的 PSLL。图 5 给出了 DE 算法最好、最差单次和 10 次平均收敛曲线。最 好稀疏六边形天线阵激励单元数 T=679,在 60°扫 描范围内 PSLL=-25.93 dB。与文献[2]相比 PSLL 改善了5.1 dB,有源单元数增加了 71 个,扫描范围 内的方向性系数改善0.3~0.6 dB,最好结果与文 献[2]采用遗传算法详细参数对比如表 3 所示。图 6 为扫描时最好阵列在 θ =0°和 θ =60°的截面方向 图,最好阵列的单元分布图如图 7 所示。





表 3 扫描阵列最好结果与文献[2]遗传算法对比

Table 3 Comparison of scan results between DE and GA

算法	θ∕(°)	<i>φ</i> ∕(°)	PSLL/dB			D/JD
			$\varphi = 0^{\circ}$	$\varphi = 90^{\circ}$	全φ面	· <i>D/</i> (1D
本文	0	0	-26.02	-26.31	-26.02	32.4
(单元数	60	0	-26.02	-28.19	-26.02	30.1
679个)	60	90	-27.39	-26.17	-25.93	30.0
文献[2]	0	0	-27.45	-25.86	-20.89	31.8
(单元数	60	0	-22.94	-24.59	-20.78	29.5
606个)	60	90	-27.45	-26.08	-20.89	29.7





图 6 最好阵扫描 0°和 60°的两个截面方向图 Fig. 6 Pattern of best array with scanning at 0° and 60°



图 7 扫描六边形稀疏阵列最好单元分布图 Fig. 7 Elements distribution in aperture with scan

5 结束语

标准差分进化算法只能处理连续空间的优化问题,无法直接应用于离散优化问题。为了使 DE 算法能够应用于离散优化问题,本文提出了一种基于取整策略的 DE 算法,只需在适应度函数的计算过程对目标向量进行取整,使得标准 DE 算法可以应用于稀疏阵列方向图优化。利用取整策略的 DE 算法对六边形阵列天线进行优化稀疏布阵处理,为了.1369.

快速计算六边形阵列的辐射场,通过在阵列中添加 虚拟单元的方式,从而能够利用 FFT 快速地计算三 角排布阵列的辐射方向图。以改善六边形阵列的峰 值副瓣电平为目的,取得了比遗传算法更优的结果, 且该方法使计算量成倍减少,也可进一步用于解决 其他种类的矩形阵和三角阵平面阵列天线的稀疏布 阵优化,因而具有很好的工程实用价值。

参考文献:

- [1] KEIZER W P M N. Synthesis of Thinned planar circular and square Arrays using density tapering[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(4):621–634.
- [2] 李东风,龚中麟.六边形平面天线阵优化稀疏布阵研究[J].电子学报,2002,30(3):376-380.
 LI Dongfeng, GONG Zhonglin. Research on Thinning the Hexagonal Planar Antenna Array [J]. Acta Electronica Sinica,2002,30(3):376-380. (in Chinese)
- [3] JIN N, RAHMAT-SAMII Y. Advances in particle swarm optimization for antenna design:real-number, binary, single-objective and multiple objective implementations[J].
 IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55 (3):556-567.
- [4] 史东湖, 习靖, 周志伟. 对称平面稀疏阵列阵形优化方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(4):302-305.
 SHI Donghu, XI Jing, ZHOU Zhiwei. Research on optimization method of symmetric thinned planararray[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(4):302-305. (in Chinese)
- [5] ZHANG L, JIAO Y C, WENG Z B, et al. Design of planar thinned arrays using a Boolean differential evolution algorithm [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2010,4(12):2172-2178.
- [6] DONELLI M, MARTINI A, MASSA A. A hybrid approach based on PSO and Hadamard difference sets for the synthesis of square thinned arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(8):2491–2495.
- [7] YEPES L F, CONVARRUBIAS D H, ALONSO M A, et al. Hybrid Sparse Linear Array Synthesis Applied to Phased Antenna Arrays[J]. IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters, 2014, 13(1):185–188.
- [8] BUCCI O M, PERNA S, PINCHERA D. Synthesis of Isophoric Sparse Array Allowing Zoomable Beams and Arbitrary Coverage in Satellite Communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(4): 1445-1457.
- [9] STORN R, PRICE K. Differential evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [10] ZHANG F G, JIA W M, YAO M L. Linear Aperiodic Ar-• 1370 •

ray Synthesis Using Differential Evolution Algorithm [J]. IEEE Antennas and Wireless propagation Letters, 2013,12(9):797-800.

- [11] GOUDOS S K, SAHALOS J N. Pareto Optimization Microwave Filter Design Using Multiobjective Differential Evolution [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(1):132-142.
- [12] YANG S, GAN Y B, QING A. Sideband suppression in time modulated linear arrays by the differential evolution algorithm[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2002(1):173-175.
- [13] GREENWOOD G W. Using differential evolution for a subclass of graph theory problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(5):1190-1192.
- [14] DIETRICH F J, METZEN P, MONTE P. The Globalstar Cellular satellite system [J]. IEEE Transactions on Antennas, 1998, 46(6):935-942.
- BREST J, GREINER S, BOSKOVIC B, et al. Self-adapting control parameters in differential evolution: A comparative study on numerical benchmark problems [J].
 IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(6):646-657.

作者简介:



刘 恒(1986—),男,湖南衡阳人,2012 年于中国空间技术研究院获硕士学位,现为 博士研究生,主要研究方向为阵列天线优化 与设计;

LIU Heng was born in Hengyang, Hunan Province, in 1986. He received the M. S. degree from China Academy of Space Technology in

2012. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns array antenna design and optimization.

Email:linheng@mail.nankai.edu.cn

赵宏伟(1982—),男,山东潍坊人,2008 年于东北大学 获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为 DOA 估计与 智能算法;

ZHAO Hongwei was born in Weifang, Shandong Province, in 1982. He received the M. S. degree from Northeastern University in 2008. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns DOA estimation and smart method.

李维梅(1986—),女,甘肃陇西人,博士研究生,主要研 究方向为射频子系统关键技术;

LI Weimei was born in Longxi, Gansu Province, in 1986. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns key technology of RF system.

刘 波(1963—),男,湖南汉寿人,研究员、博士生导师,主要研究方向为卫星总体设计。

LIU Bo was born in Hanshou, Hunan Province, in 1963. He is now a senior engineer of professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns satellite system design.