

文章编号: 2095-4980(2016)04-0562-05

通道幅相误差对数字阵列天线性能影响及校准

唐晓雷, 张令坤, 陈 飞

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

摘要: 为实现低副瓣数字阵列天线性能, 需要对阵面通道幅相误差进行校准。针对此问题, 定性分析了通道幅相误差、阵面通道数与数字阵列天线主要性能(副瓣电平、波束指向、增益)的相对关系, 分析结果表明: 通道间幅相误差越大, 副瓣电平、波束指向、增益越差; 通道数越多, 副瓣电平、波束指向受通道误差影响越小, 而增益受通道幅相误差的影响与阵面通道数无关。结合数字阵雷达实际使用中阵面通道幅相误差修调问题, 重点研究了通道误差测量方法。给出了利用内监测法和中场测量法进行通道误差测量的原理、实现方法及适用条件, 该 2 种通道误差测量方法可以作为互补手段使用。最后, 给出了一种基于多次测量取平均值的数字阵列幅相误差校准方法, 仿真结果表明: 校准前后, 通道幅相误差分别由 2 dB 和 20° 变为 0.4 dB 和 2°, 满足指标要求。

关键词: 数字阵列天线; 幅相误差; 内监测法; 中场测量法; 误差校准

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0562

Effect of channel amplitude/phase errors on digital array performance and calibration

TANG Xiaolei, ZHANG Lingkun, CHEN Fei

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

Abstract: The calibration of channel amplitude/phase errors is necessarily required in order to achieve the performance of low side-lobe digital array. The relationships among channel amplitude/phase errors, array channels and the main performance (side-lobe level, beam direction, gain) of digital array are analyzed. Analysis results show that, the side-lobe, gain and beam direction would deteriorate as the amplitude/phase errors increase; the influence degree of amplitude/phase errors on the side-lobe level and beam direction would decrease as the number of the array channels increase; the influence of amplitude/phase errors on gain is independent on the number of the array channels. According to the adjustment problem of channel amplitude/phase errors in digital array application, as a complementary method of measuring the channel amplitude/phase errors, the principle, implementation methods and application conditions of internal-monitor and mid-field measurement are studied in detail. A calibration method of channel amplitude/phase errors is put forward. Simulation results show that after calibration, the channel amplitude/phase errors decrease from 2 dB and 20° to 0.4 dB and 2° respectively, which meets the expected specification.

Key words: digital array antenna; amplitude/phase errors; internal-monitor; mid-field measurement; errors calibration

以数字发射机和接收机(Transmitter and Receiver, T/R)组件和数字波束形成(Digital Beamforming, DBF)技术为核心和标志的数字阵列雷达(Digital Array Radar, DAR)是一种全数字化相控阵雷达, 能有效实现现代雷达必备的高精确度、多功能、多目标、抗干扰、自适应等能力。新时期战场环境、作战对象的不断变化对雷达探测性能的要求越来越高, 以及大规模微波/数字集成电路、微处理器、光控技术的发展, 进一步推动了低副瓣、超低副瓣数字阵列雷达的研究和实现^[1-4]。在数字阵列雷达^[5]中, DBF 的实现是在数字域进行的, DBF 的数字域

处理对阵面性能的影响微乎其微。阵面只负责回波信号的电磁转换、下变频、RF/IF STC(Sensitivity Time Control)、A/D 转换等工作,即只起到通道的作用。通道幅相不一致对阵面的影响主要体现在波束副瓣电平、波束指向及阵面增益^[6]。本文借助 Matlab 仿真软件分析了通道幅相误差对数字阵列天线主要性能影响,结合数字阵列雷达实际使用中阵面通道幅相修调问题,重点研究内监测法和中场测量法进行阵面幅相误差测量的原理、实现方法及适用条件,最后给出一种基于多次测量取平均值的数字阵列幅相误差校准方法。

1 数字阵列天线模型

设数字阵列第 (m,n) 个通道的幅相误差分别为 $\Delta\alpha_{(m,n)}$ 和 $\Delta\phi_{(m,n)}$;DBF 系统对应第 (m,n) 个通道复加权系数为 $W_{(m,n)} = w_{(m,n)} \exp(j(mu_0 + nv_0))$, $u_0 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_0 \cos \varphi_0$, $v_0 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_0 \sin \varphi_0$ 。二维数字阵列天线综合方向图可表示为:

$$F(u,v) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w_{(m,n)} (1 + \Delta\alpha_{(m,n)}) \exp(j(mu + nv + \Delta\phi_{(m,n)})) \quad (1)$$

式中: $u = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \cos \varphi - \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_0 \cos \varphi_0$; $v = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \sin \varphi - \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_0 \sin \varphi_0$ 。当 $\alpha_{(m,n)} = 0, \Delta\phi_{(m,n)} = 0$ 时,为理想二维数字阵列天线的方向图,计为 $F_0(u,v)$ 。当 $\alpha_{(m,n)} \neq 0$,或 $\Delta\phi_{(m,n)} \neq 0$ 时,为非理想二维数字阵列天线的方向图,计为 $F(u,v)$ 。由通道幅相误差引起的误差方向图计为 $F_{\text{err}}(u,v)$,通道故障问题不在此文讨论。则二维数字阵列方向图可表示为^[7]:

$$\begin{cases} F(u,v) = F_0(u,v) + F_{\text{err}}(u,v) \\ F_{\text{err}}(u,v) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w_{(m,n)} \Delta\alpha_{(m,n)} \exp(j(mu + nv)) + j \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w_{(m,n)} \Delta\phi_{(m,n)} \exp(j(mu + nv)) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)表明:由于通道幅相误差的存在,天线误差方向图增加了一个误差分量,从而导致天线方向图副瓣恶化,增益下降,指向偏差。

2 幅相误差对数字阵列天线性能影响分析

文献[7]讨论了存在通道故障率情况下幅相误差对相控阵天线副瓣电平、增益和波束指向的影响。并给出了均方根理论计算公式,如式(3)~式(5)所示。

$$\sigma_{\Delta R} = \frac{f(u,v)}{f(u_0,v_0)} \sqrt{\frac{1 - P + \sigma_{\Delta A}^2(u,v) + P\sigma_{\Delta\phi}^2(u,v)}{2\eta MNP}} \quad (3)$$

$$\sigma_{\Delta\theta} = \frac{\sqrt{12(1 + \sigma_A^2)} \sigma_{\Delta\phi}}{\left(\frac{2\pi}{\lambda} d\right) MN} \quad (4)$$

$$\frac{G(u_0,v_0)}{G_0(u_0,v_0)} = \frac{1}{1 + (1 - P + \sigma_A^2(u_0,v_0) + P\sigma_{\Delta\phi}^2(u_0,v_0)) / P} \quad (5)$$

通道故障不在本文讨论范围,令 $P=1$, $\eta=1$ 可得通道幅相误差对阵面性能的影响,如式(6)~式(8)所示。

$$\sigma_{\Delta R} = \frac{f(u,v)}{f(u_0,v_0)} \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta A}^2(u,v) + \sigma_{\Delta\phi}^2(u,v)}{2\eta MNP}} \quad (6)$$

$$\sigma_{\Delta\theta} = \frac{\sqrt{12(1 + \sigma_A^2)} \sigma_{\Delta A}}{\left(\frac{2\pi}{\lambda} d\right) MN} \quad (7)$$

$$\frac{G(u_0,v_0)}{G_0(u_0,v_0)} = \frac{1}{1 + \sigma_A^2(u_0,v_0) + \sigma_{\Delta\phi}^2(u_0,v_0)} \quad (8)$$

式中: $\sigma_{\Delta A}^2$ 和 $\sigma_{\Delta\phi}^2$ 为通道幅相均方差; $M \times N$ 为阵列中单元数目; P 为阵面有效通道率; $f(u,v)$ 为天线单元的场强方向图; $f(u_0,v_0)$ 为天线波束扫描方向的单元场强方向图; $G_0(u_0,v_0)$ 和 $G(u_0,v_0)$ 分别为无(有)通道幅相误差的阵面增益; η 为阵面效率。 $\sigma_{\Delta R}^2$ 和 $\sigma_{\Delta\theta}^2$ 分别为数字阵列均方副瓣电平和均方波束指向误差。

通道幅相误差对数字阵面主要性能(副瓣电平, 增益, 波束指向)的影响如图 1~图 3 所示。

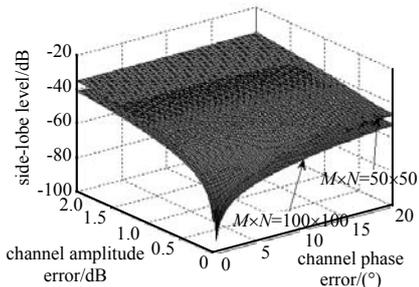


Fig.1 Channel amp/phase error's effects on side-lobe level
图 1 通道幅相误差对副瓣电平影响

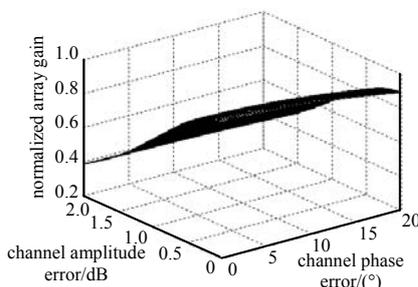


Fig.2 Channel amp/phase error's effects on gain
图 2 通道幅相误差对阵列增益影响

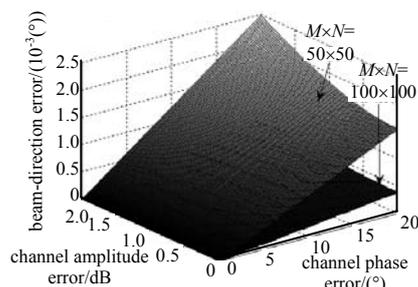


Fig.3 Channel amp/phase error's effects on beam-direction
图 3 通道幅相误差对数字阵列天线波束指向影响

从式(6)~式(8)和图 1~图 3 可以得出如下结论:

- 1) σ_R^2 与通道幅相误差 σ_A^2 和 σ_ϕ^2 成正比, 即幅相误差越大, 实际副瓣偏离理想副瓣电平的程度也就越大。
- 2) σ_R^2 与天线单元数 $M \cdot N$ 成反比, 单元数越多, 副瓣变差的可能性越小。
- 3) 阵面增益损失与通道幅相误差 σ_A^2 和 σ_ϕ^2 成正比, 即幅相误差越大, 阵面增益损失越大。
- 4) 阵面无单元故障情况下, 阵面增益损失与阵面单元数无关。
- 5) $\sigma_{\Delta\theta}^2$ 与通道幅相误差 σ_A^2 和 σ_ϕ^2 成正比, 即幅相误差越大, 实际副瓣偏离理想副瓣电平的程度也就越大。
- 6) $\sigma_{\Delta\theta}^2$ 与天线单元数 $M \times N$ 成反比, 单元数越多, 阵列波束指向受影响的程度越小。

3 阵面通道幅相误差测量

3.1 内监测法

数字阵面内监测系统如图 4 所示, 利用数字阵列雷达的优势, 实现在线、快速、实时的阵面监测、通道误差修正和阵面性能评估。图 4 中, B 点表示监测组件输出口, A_1, A_2, \dots, A_{MN} 表示各数字 T/R 组件入口(耦合器输出口), O_1, O_2, \dots, O_{MN} 表示各数字 T/R 组件输出口。

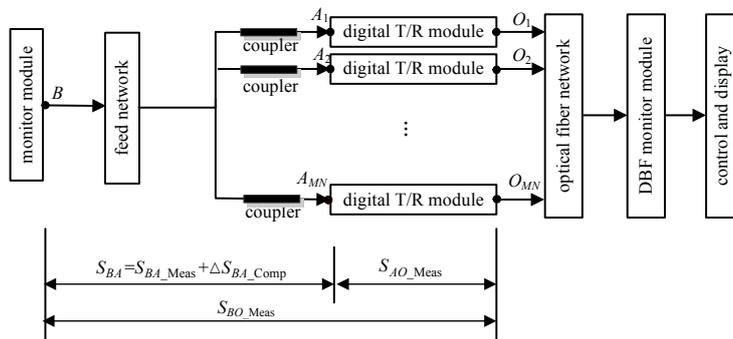


Fig.4 Schematic diagram of DAR internal-monitor system
图 4 数字阵列雷达内监测系统示意图

利用内监测法进行通道幅相误差测量的方法如下:

- 1) 精确测量出监测组件输出口至耦合器输出多端口网络的复向量 $S_{BA\text{测}}(1,i), i=1,2,\dots,M \times N$, $M \times N$ 为阵面通道数, 并通过计算, 求得监测网络的幅相补偿数据 $S_{BA\text{补}}(1,i)$, 可得 $S_{BA}(1,i) = S_{BA\text{测}}(1,i) + S_{BA\text{补}}(1,i)$, 最终求得整个阵面监测网络所有输出口面的 S_{BA} 相等, 即修平监测网络。
- 2) 通过内监测法测出信号经过监测组件输出口至 DBF 监测模块复变化量 $S_{BO\text{测}}$, 由于数字 T/R 组件出已经是数字信号, 可以认为 $S_{BO\text{测}}$ 即为数字 T/R 出信号复变化量。
- 3) 监测信号从耦合器流经数字 T/R 组件的幅相变化量 $S_{AO\text{测}}(1,i) = S_{BO\text{测}}(1,i) - S_{BA\text{测}}(1,i) - S_{BA\text{补}}(1,i)$ 。即实现对所有通道幅相误差的测量。

利用内监测方法测量阵面通道幅相误差的优缺点如下:

- 1) 只要能够精确测量出监测网络的差损 $S_{BA\text{测}}$, 并配平监测网络的幅相误差 $S_{BA\text{补}}$, 就能够实现对阵面所有通道幅相误差的精确测量。否则可能将监测网络的误差引入到正常工作通道, 给工作通道带来额外的误差。

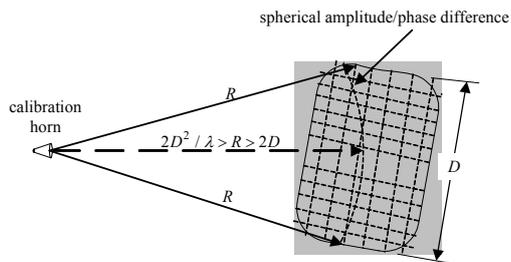


Fig.5 Schematic diagram of mid-field measurement
图 5 中场测量法原理示意图

2) 在 T/R 组件安装阵面之前，监测网络及耦合器已经安装、测量到位。对于大型数字阵，在日常使用过程中，一旦发生监测网络大面积故障情况，之前装订的监测网络补偿数据将失效，且馈网的二次拆装将非常困难，作为一种阵面通道误差测量方法，内监测法将失去效力。

3.2 中场测量法

中场测试的原理如图 5 所示。校准喇叭与待测阵面的距离 $R > 2D$ (D 为阵面直径)，校准喇叭到阵面的辐射场强为球面，待测阵面每个单元接收到的信号是带有球面相差和球面幅度差的复信号，只要严格测量出球面相差和球面幅度差，就可以精确地算出阵面各通道出误差。具体方法如下：

- 1) 精确标定校准喇叭的坐标 (x_0, y_0, z_0) ，阵面上的中心坐标 $(x_{0_zm}, y_{0_zm}, z_{0_zm})$ ；
- 2) 单元一般规则排布，设单元总数为 $M \times N$ 个，设第 (m, n) 个单元坐标为 (x_{mn}, y_{mn}, z_{mn}) ， $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$ ；
- 3) 设第 (m, n) 个单元接收到校准喇叭的辐射信号为 $S_{(m,n)} = A_{(m,n)} e^{j\varphi(m,n)}$ ；

4) 第 (m, n) 个单元的球面幅相差：喇叭至阵面第 (m, n) 点的距离 $R_{ball} = \sqrt{(x_{mn} - x_0)^2 + (y_{mn} - y_0)^2 + (z_{mn} - z_0)^2}$ ；喇叭至阵面所有单元中最短的距离为 $R_{ball_min} = \min(R_{ball})$ ；喇叭至阵面第 (m, n) 点的球面相位差为 $\Delta\varphi_{mn_ball} = \text{mod}((R_{ball})/(\lambda 2\pi), \lambda 2\pi)$ ；喇叭至阵面第 (m, n) 点的球面相位差为 $\Delta A_{mn_ball} = 20\lg(R_{ball} / R_{ball_min})$ ；阵面第 (m, n) 点的球面幅相差为 $S_{mn_ball} = 10^{(\Delta A_{mn_ball}/20)} e^{(j\Delta\varphi_{mn_ball})}$ ，则第 (m, n) 通道的幅相误差为 $\Delta S_{(m,n)} = S_{(m,n)} \times S_{mn_ball}$ ，整个阵面 $M \times N$ 个通道的幅相误差为矩阵复数 ΔS 。

实践证明^[8-9]，该中场测量法能够有效测量并校准低副瓣天线 ($SLL > -30$ dB) 的幅相误差。作为一种幅相误差测量方法，中场测量法和内监测法可以互为补充。

4 阵面通道幅相误差校准

传统的相控阵雷达采用被测通道与参考通道复信号相比得出幅相修正值，并通过多次迭代实现通道幅相误差校准^[10-11]，本文在传统的校准方法基础上，采用多次测量取平均值方法，实现通道幅相误差校准。如式(9)所示。设待校准通道输出信号为 $X_A(m, n)$ ，参考通道输出信号为 X_C ，通道 (m, n) 修正值为 $w_{(m,n)}$ ，则待校准通道的复修正系数为：

$$w_{BK(m,n)} = |w_{BK}| e^{j\varphi_{BK}} = \frac{\sum_{k=1}^N X_C(k) X_C^*(k)}{\sum_{k=1}^N X_C^*(k) X_{A(m,n)}(k)} \quad (9)$$

式中 N 表示采样点数。将计算所得的 $w_{BK(m,n)}$ 乘上 $X_{A(m,n)}$ ，即可完成通道幅相修正。

根据前面所述，阵面第 (m, n) 个通道幅相误差为 $(1 + \Delta a_{(m,n)}) e^{j\Delta\varphi_{(m,n)}}$ ，DBF 系统对第 (m, n) 个通道的复加权系数为 $w_{0(m,n)} e^{j\varphi_{0(m,n)}}$ ，则第 (m, n) 个通道的总复加权系数为 $w_{total(m,n)} = w_{0(m,n)} (1 + \Delta a_{(m,n)}) |w_{BK(m,n)}| e^{j(\varphi_{0(m,n)} + \varphi_{BK(m,n)} + \Delta\varphi_{(m,n)})}$ 。

在理想情况下，通道通过幅相补偿后，应有： $(1 + \Delta a_{(m,n)}) |w_{BK(m,n)}| = 1$ ， $\varphi_{BK(m,n)} + \Delta\varphi_{(m,n)} = 0$ ，即 $w_{total(m,n)} = w_{0(m,n)} e^{j\varphi_{0(m,n)}}$ ，为 DBF 系统加权系数。阵面幅相补偿后，DBF 系统将整个阵面的复加权系数加载在指定存储模块中，以便在工作时可实时调用。

假设阵面通道数为 10 个，利用其中 1 个通道作为参考通道，对阵面 10 个通道进行校准，10 个通道幅相误差分别设定为最大值为 2 dB 和 20° 的随机误差。对所有通道进行 5 次采样，采样幅相误差设定为最大值 1.1 dB 和 5° 随机误差。利用 Matlab 软件对校准前后通道幅相误差特性进行对比分析，结果如图 6 所示。

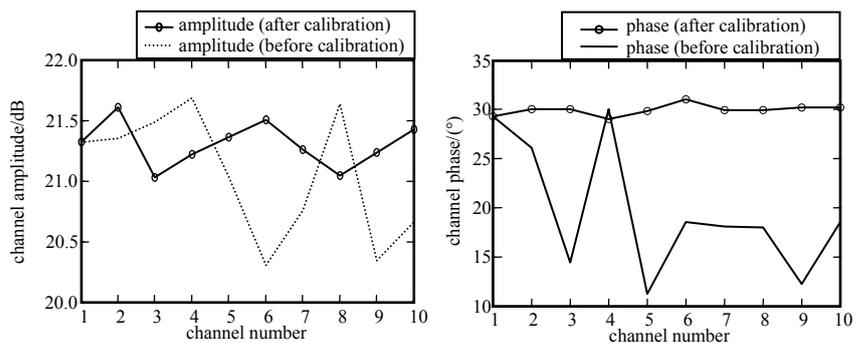


Fig.6 Channel amplitude/phase characteristic comparison before and after calibration
图 6 校准前后通道幅相特性比对

5 结论

通道幅相误差影响低副瓣数字阵面性能的实现,文中分析了通道幅相误差对阵面主要性能的影响。结合数字阵实际应用中遇到的通道幅相误差修调问题,文中给出的作为互补手段的内监测法和中场测量法以及数字阵列幅相误差校准方法,在工程应用上具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] HORN Joe. AEGIS weapon system with AMDR[C]// Sea-Air-Space Symposium. 2014:1-18.
- [2] BERTUCA Tony. Air and missile defense radar program moves to EMD phase[J]. Inside Missile Defense, 2014,20(16):2-7.
- [3] 朱伟,陈伯孝,周琦. 两维数字阵列雷达的数字单脉冲测角方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011,33(7):1504-1509. (ZHU Wei, CHEN Boxiao, ZHOU Qi. Angle measurement method with digital monopulse for 2-dimensional digital array radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011,33(7):1504-1509.)
- [4] 汤小为,汤俊,彭应宁. 数字阵列雷达并行信号处理算法研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2009,7(4):294-299. (TANG Xiaowei, TANG Jun, PENG Yingning. Parallel algorithm for digital array radar and its implementation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2009,7(4):294-299.)
- [5] 张明友. 数字阵列雷达和软件化雷达[M]. 北京:电子工业出版社, 2007. (ZHANG Mingyou. Digital Array Radar and Software Defined Radar[M]. Beijing:Electronics Industry Press, 2007.)
- [6] ROBERT J Mailloux. Phased Array Antenna Handbook[M]. 北京:电子工业出版社, 2007. (ROBERT J Mailloux. Phased Array Antenna Handbook[M]. Beijing:Electronics Industry Press, 2007.)
- [7] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:137-139. (ZHANG Guangyi. Principles of Array Radar[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2007:137-139.)
- [8] 陈文俊. 数字阵列天线测量方法研究[J]. 雷达与对抗, 2014,34(2):40-43. (CHENG Wenjun. Measurement methods for a digital array antenna[J]. RADAR & ECM, 2014,34(2):40-43.)
- [9] 郑雪飞,高铁. 相控阵天线中场校正技术研究[J]. 微波学报, 2005,21(5):22-25. (ZHENG Xuefei, GAO Tie. Study on mid-field calibration of phased array antenna[J]. Journal of Microwaves, 2005,21(5):22-25.)
- [10] 冷红英,张扬,唐斌. 阵列通道误差校正算法及 DSP 实现[J]. 电子科技大学学报, 2005,33(5):511-514. (LENG Hongying, ZHANG Yang, TANG Bin. Array antenna channel uncertainty calibration algorithm and DSP implementation[J]. Journal of UEST of China, 2005,33(5):511-514.)
- [11] 左平. 有源相控阵雷达多通道幅相校准研究[J]. 现代雷达, 2009,31(10):14-16. (ZUO Ping. A study on errors of multi-channel amplitude and phase calibration for active phased array antenna[J]. Modern Radar, 2009,31(10):14-16.)

作者简介:



唐晓雷(1983-),男,江苏省泗阳县人,硕士,工程师,主要研究方向为相控阵雷达电讯总体技术及系统集成技术.email:leilei627408@126.com.

张令坤(1977-),女,河北省任丘市人,学士,工程师,主要研究方向为相控阵雷达电讯总体技术及系统集成技术.

陈飞(1976-),男,南京市人,学士,高级工程师,主要研究方向为相控阵雷达电讯总体技术及系统集成技术.