

文章编号: 2095-4980(2019)03-0440-05

阵元失效对相控阵天线绝对时延影响分析

陈腾博, 杜海龙, 江 涛

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘 要: 相控阵天线的阵元失效会造成绝对时延等性能参数的恶化。利用相控阵天线阵列综合和群时延特性的原理, 分析了天线阵元随机分布失效和子阵失效情况下, 天线绝对时延随之变化的趋势。通过算例仿真可知, 在阵元随机失效数学模型下, 天线绝对时延受失效阵元分布形式和失效阵元数量因素影响较大, 20%的阵元失效情况下时延偏差最大达到 0.39 ns; 在子阵失效数学模型下, 靠近阵面中心位置, 子阵失效会导致绝对时延出现较大偏差。分析结果及结论可用于实际相控阵天线绝对时延的修正。

关键词: 相控阵天线; 绝对时延; 失效; 影响

中图分类号: TN821⁺.8

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201903.0440

Analysis of elements failure effects on absolute time delay of phased array antenna

CHEN Tengbo, DU Hailong, JIANG Tao

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The failure of phased array antenna elements, can worsen the antenna performance such as absolute time delay. By use of the synthesis of array antennas and group delay theory, the variety of absolute time delay is analyzed, versus random distribution of elements failure and sub-array failure. By the random distribution numerical model, simulation results show that absolute time delay is affected by distribution and quantity of failure elements, and the deviation of time delay approaches to 0.39 ns on 20% elements failure. By the sub-array numerical model, the larger deviation of time delay will be caused by sub-array failure near the center of antenna array. The analysis results and the conclusion can be utilized to correct absolute time delay of phased array antenna.

Keywords: phased array antenna; absolute time delay; failure; effects

相控阵天线可用一个波束覆盖整个空间的扫描范围, 充分利用了天线波束扫描的灵活性, 合理分配了能量^[1]。近年来, 相控阵天线技术广泛应用在通信、导航、电子侦察和相控阵雷达系统等任务中。在导航系统中, 为了保证长期工作状态下系统定位精确度和测距精确度满足用户需求, 要求相控阵天线具有准确的传输时延零值, 即要求相控阵天线的绝对时延必须稳定^[2]。相控阵天线是一个由多个阵元组成的系统, 阵元的失效会对相控阵天线的性能产生影响^[3]。目前阵元失效对相控阵天线性能影响的研究, 主要集中在增益、副瓣性能^[4-6]和相位中心性能^[7], 尚未出现对相控阵天线绝对时延影响研究的文献报道。

本文采用相控阵天线阵列综合原理获得满足远场条件的特定位置相控阵天线电场的相位值, 通过对相位求导获得相控阵天线到特定位置空间传输段实际时延值, 进而确定相控阵天线的绝对时延值。借助此方法给出了失效阵元随机分布配置对绝对时延的影响分析, 然后给出了根据二维平面相控阵天线布局方式, 考虑馈电网络发生故障后, 导致相控阵天线子阵(整行)失效情况下对绝对时延的影响分析。通过分析证明相控阵天线绝对时延偏差大小取决于失效单元的数量和分布方式。基于本文方法, 可以对出现阵元失效的相控阵天线绝对时延偏差进行修正, 确保满足系统对相控阵天线绝对时延稳定性的要求。

1 理论分析

相控阵天线绝对时延的标定通常采用图 1 中测试系统^[8-10], 包括测试电缆时延值(τ_1)、标定天线时延值(τ_2)、

空间传输段实际时延值(τ_3)和相控阵天线绝对时延值(τ_a)，通过矢网等测试设备对待测闭环系统的传输总时延 τ 进行测试：

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_a \quad (1)$$

τ_1 和 τ_2 均通过单独测试标定， τ_3 由空间距离 L 确定，测试时默认为 $\tau_3=L/0.3$ 。因此只要测出时延测试系统总时延值，按式(1)可以得到 τ_a 。

相控阵天线绝对时延测试系统中， τ_1 和 τ_2 均不会出现变化， τ_3 由空间距离直接获得，理论上也认为不变。

相控阵天线是由多个天线阵元组成的系统， τ_3 是由多个阵元时延组合而成的，当出现阵元失效时， τ_3 会因相频特性改变而出现变化，进而导致相控阵电线的绝对时延值 τ_a 出现偏差。

相控阵天线绝对时延测试时，在满足远场条件的特定位置设置用于接收信号的标定天线，标定天线为宽波束天线，可采用阵列电场综合原理来计算标定天线位置的电场强度，计算公式为：

$$E_t = A_t e^{j\phi} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{G(\theta, \varphi) G_c P_0} \frac{\lambda \exp(-jkr_{m,n}) \exp(-j\delta_{m,n})}{4\pi r_{m,n}} \quad (2)$$

式中： E_t 为满足远场条件的特定位置处标定天线接收到相控阵天线的电场强度； A_t 为电场强度的幅度； ϕ 为电场强度的相位； $G(\theta, \varphi)$ 为相控阵天线阵元的阵中增益， (θ, φ) 为在天线本体坐标系下，波束指向角度； G_c 为标定天线的增益； $r_{m,n}$ 为天线单元与标定天线间的距离； P_0 为相控阵天线阵元输出的功率； $\delta_{m,n}$ 为相控阵天线阵元移相值，以使阵面合成方向图指向接收标定天线位置； M 为行总数； N 为列总数。

相控阵天线至标定天线传输时延值 τ_3 为相频响应的一阶导数^[11-12]，计算公式如下：

$$\tau_3 = -\frac{d\phi}{d\omega} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df} \quad (3)$$

采用上述公式可以计算相控阵天线在特定位置的绝对时延值。通过切换相控阵天线和标定天线的收发状态，借助该测试系统和本文方法，可以完成阵元失效对相控阵天线收发时延的影响分析。

2 阵元随机失效影响分析

本文研究相控阵天线工作频率为 21~23 GHz，天线单元采用微带天线形式^[13-14]，单元个数为 320 个(20 行×16 列)，单元间距 0.5λ ，采用二维平面三角形栅格分布阵列^[15]，波束覆盖范围 $\varphi=0\sim 360^\circ$ ， $\theta=0\sim 60^\circ$ 。阵列布局示意图 2， X 方向为行方向(m)， Y 方向为列方向(n)。该相控阵天线的幅度、相位采用等幅同相分布设计。标定天线距离相控阵天线 13.5 m，即 45 ns，已处于该相控阵天线的远场区。

给出了 10% 和 20% 随机分布阵元失效条件下对相控阵天线绝对时延的影响分析。失效阵元的分布是随机的，因此阵元失效对相控阵天线绝对时延的影响需要通过统计特性来反映，针对 10% 和 20% 两种比例的失效设置，每种设置取 20 个样本来分析阵元失效对相控阵天线绝对时延的影响，每个样本均为 $\varphi=0\sim 165^\circ$ (15° 间隔，共 12 个切面)， $\theta=-60^\circ\sim 60^\circ$ (1° 间隔，共 121 个波位) 波束覆盖范围内的最大时延偏差值。式(3)中频率采样间隔为 10 MHz，由于本文研究的相控阵天线为窄带工作，故只给出中心频点的分析结果。

10% 阵元随机失效和 20% 阵元随机失效情况下，时延最大偏差值和最大偏差值所在位置见表 1。10% 阵元随机失效时，20 个样本时延曲线见图 3；20% 阵元随机失效时，20 个样本时延曲线见图 4。

由图 3 和图 4 可以看出，阵元无失效时，相控阵天线空间传输端时延为 45 ns，与理论值一致；当存在 10% 的阵元失效时，相控阵天线空间传输端时延最大偏差在 ± 0.25 ns 以内；当存在 20% 的阵元失效时，相控阵天线

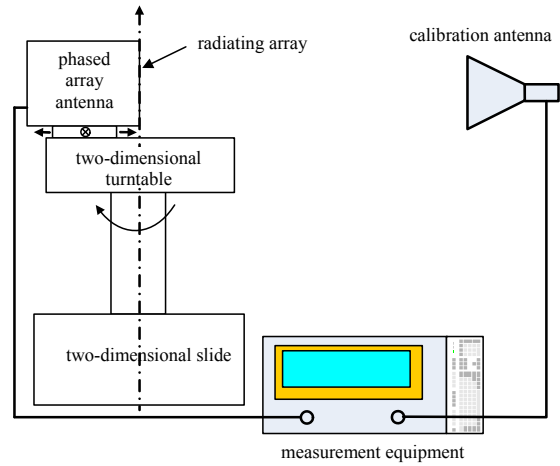


Fig.1 Measurement system of phased array antenna absolute time delay
图 1 相控阵天线绝对时延测试系统框图

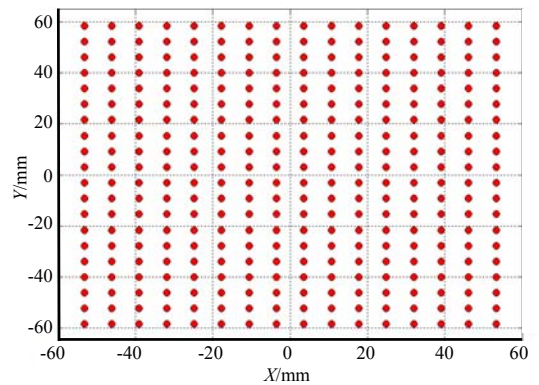


Fig.2 Layout of the array antenna
图 2 天线阵面布局图

空间传输端时延最大偏差在 ± 0.4 ns 以内。失效阵元数量越多，空间传输端时延的偏差越大，即相控阵天线绝对时延偏差越大。

表 1 阵元失效引起的最大时延偏差值
Table 1 Maximum time delay deviations of elements failure

No.	10% elements failure		20% elements failure	
	pointing angle	time delay deviations/ns	pointing angle	time delay deviations/ns
1	$\varphi=30^\circ, \theta=-47^\circ$	0.169	$\varphi=90^\circ, \theta=-47^\circ$	-0.264
2	$\varphi=75^\circ, \theta=9^\circ$	0.087	$\varphi=120^\circ, \theta=-17^\circ$	0.159
3	$\varphi=0^\circ, \theta=17^\circ$	0.146	$\varphi=30^\circ, \theta=47^\circ$	-0.276
4	$\varphi=120^\circ, \theta=-44^\circ$	0.145	$\varphi=30^\circ, \theta=-47^\circ$	0.356
5	$\varphi=30^\circ, \theta=-47^\circ$	-0.168	$\varphi=0^\circ, \theta=-17^\circ$	0.248
6	$\varphi=105^\circ, \theta=-34^\circ$	0.152	$\varphi=150^\circ, \theta=37^\circ$	0.247
7	$\varphi=30^\circ, \theta=-47^\circ$	0.248	$\varphi=90^\circ, \theta=-47^\circ$	-0.391
8	$\varphi=90^\circ, \theta=47^\circ$	-0.239	$\varphi=30^\circ, \theta=-47^\circ$	0.356
9	$\varphi=120^\circ, \theta=-44^\circ$	0.078	$\varphi=150^\circ, \theta=-38^\circ$	0.337
10	$\varphi=30^\circ, \theta=47^\circ$	-0.159	$\varphi=90^\circ, \theta=-47^\circ$	-0.250
11	$\varphi=120^\circ, \theta=44^\circ$	0.149	$\varphi=120^\circ, \theta=17^\circ$	0.253
12	$\varphi=30^\circ, \theta=-47^\circ$	0.157	$\varphi=120^\circ, \theta=-17^\circ$	0.267
13	$\varphi=30^\circ, \theta=47^\circ$	0.233	$\varphi=90^\circ, \theta=47^\circ$	-0.349
14	$\varphi=0^\circ, \theta=17^\circ$	0.210	$\varphi=150^\circ, \theta=-37^\circ$	0.260
15	$\varphi=150^\circ, \theta=-37^\circ$	0.079	$\varphi=30^\circ, \theta=47^\circ$	0.272
16	$\varphi=150^\circ, \theta=37^\circ$	0.151	$\varphi=0^\circ, \theta=-17^\circ$	0.142
17	$\varphi=150^\circ, \theta=19^\circ$	0.158	$\varphi=30^\circ, \theta=47^\circ$	0.257
18	$\varphi=30^\circ, \theta=-47^\circ$	0.167	$\varphi=40^\circ, \theta=47^\circ$	0.171
19	$\varphi=90^\circ, \theta=47^\circ$	-0.234	$\varphi=90^\circ, \theta=47^\circ$	-0.173
20	$\varphi=150^\circ, \theta=-19^\circ$	0.221	$\varphi=0^\circ, \theta=17^\circ$	0.300
	Max	0.248	Max	-0.391

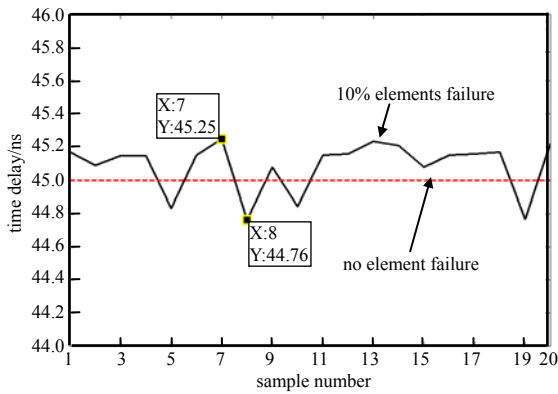


Fig.3 Time delay deviations of 10% elements failure
图 3 10%阵元失效引起的时延偏差

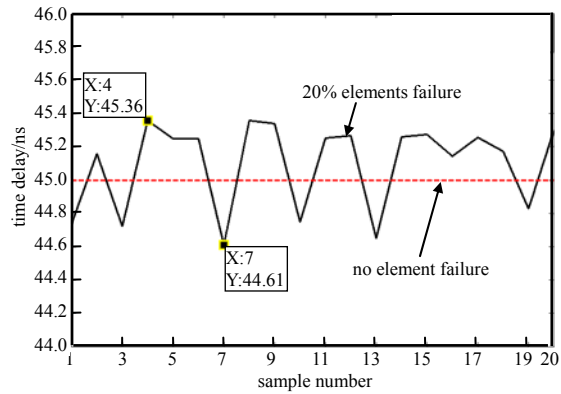


Fig.4 Time delay deviations of 20% elements failure
图 4 20%阵元失效引起的时延偏差

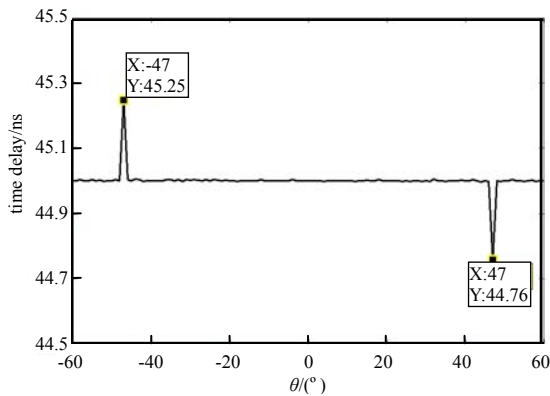


Fig.5 Time delay deviations of angles on sample 7(10% elements failure)
图 5 10%阵元失效，样本 7 不同指向时延偏差

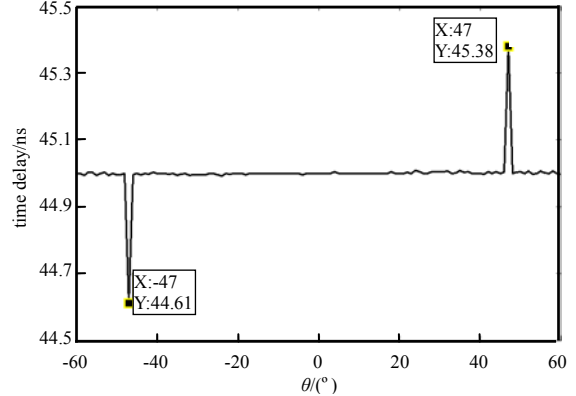


Fig.6 Time delay deviations of angles on sample 7(20% elements failure)
图 6 20%阵元失效，样本 7 不同指向时延偏差

由表 1 可以看出, 不同指向的时延偏差不同, 某些波位如 $\theta = \pm 47^\circ$ 、 $\pm 17^\circ$, 容易出现较大时延偏差值。针对表 1 中已知 φ 角度的时延偏差较大的样本, 对其不同 θ 指向的时延偏差进行了分析。10% 阵元失效状态的样本 7, 其 φ 切面为 30° 切面, 该切面不同 θ 指向的时延偏差见图 5。20% 阵元失效状态的样本 7, 其 φ 切面为 90° 切面, 该切面不同 θ 指向的时延偏差见图 6。

由图 5 和图 6 可以看出, 相控阵天线的时延偏差极大值出现在个别波位上, 除了这类偏差大的波位外, 其他位置的时延值与理论值一致。因此若诊断出阵面阵元失效位置, 可以通过分析获得时延变化较大的波位, 对该波位的绝对时延进行修正。

3 子阵失效影响分析

图 1 中二维平面相控阵天线布局, 其馈电网络为一维多通道射频组件, 馈电网络的每个通道负责相控阵天线 1 个行子阵工作, 若馈电网络 1 个通道出现故障, 则对应的相控阵天线的 1 个行子阵全部失效, 这类子阵级失效是相控阵天线常见的失效模式。本文考虑不同位置, 单行子阵和两行子阵失效情况下对绝对时延的影响分析。单行子阵失效时, 20 个行位置的时延曲线见图 7; 两行子阵失效时, 10 个两行位置的时延曲线见图 8。

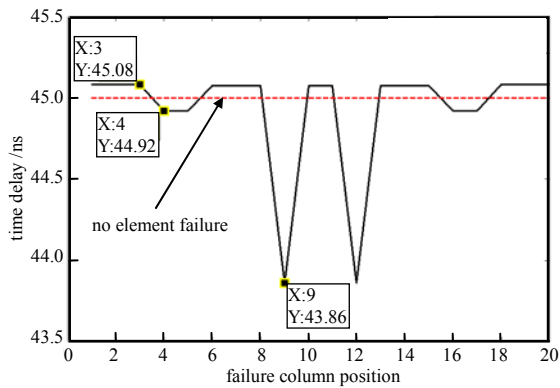


Fig.7 Time delay deviations of single column elements failure
图 7 单行子阵失效引起的时延偏差

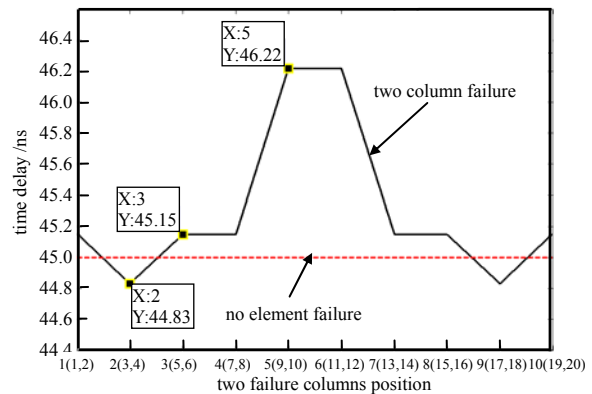


Fig.8 Time delay deviations of two column elements failure
图 8 两行子阵失效引起的时延偏差

由图 7 可看出, 两行子阵失效时, 靠近阵面中间位置(第 9, 第 12 行)出现时延最大偏差, 最大偏差值 -1.14 ns, 其他位置的偏差在 ± 0.1 ns 以内。由图 8 可看出, 两行子阵失效时, 靠近阵面中间位置(第 9 和 10 行, 第 11 和 12 行)出现时延最大偏差, 最大偏差值 1.22 ns, 其他位置的偏差在 ± 0.2 ns 以内。

由上述分析结果可知, 靠近阵面中心附近, 子阵失效会导致绝对时延出现较大偏差。若诊断出阵面子阵失效位置, 可以通过分析获得绝对时延偏差值, 根据分析结果对天线的绝对时延进行修正, 使相控阵天线的绝对时延稳定性满足要求。

4 结论

本文采用电场叠加原理获得满足远场条件的特定位置相控阵天线电场的相位数据, 通过对相位求导获得相控阵天线到特定位置空间传输段实际时延值, 进而确定相控阵天线绝对时延的变化。通过失效阵元随机分布配置对相控阵天线绝对时延的影响分析, 证明不同的失效阵元分布, 绝对时延的偏差值存在较大差异; 失效阵元数量越多, 绝对时延的偏差越大, 以本文研究的相控阵天线为例, 20% 的阵元失效情况下时延偏差达到 0.39 ns。通过子阵失效情况下对相控阵天线绝对时延的影响分析, 证明靠近阵面中心附近, 子阵会导致绝对时延出现较大偏差。基于本文方法, 可以对出现阵元失效的相控阵天线绝对时延偏差进行修正, 确保满足系统对相控阵天线绝对时延稳定性的要求。

参考文献:

- [1] PARKER D, ZIMMERMANN D C. Phased arrays part 1: theory and architectures[J]. IEEE Trans. on MTT, 2002, 50(3): 678-687.
- [2] 王礼亮, 王淑芳. 影响卫星导航定位系统设备时延的主要因素[J]. 无线电工程, 2005, 35(8): 6-8. (WANG Liliang, WANG Shufang. The main factors which affect the delay of user equipment of satellite navigation and positioning system[J]. Radio Engineering of China, 2005, 35(8): 6-8.)

- [3] 高铁,王金元,金林. 二维固态有源相控阵失效单元补偿新方法[J]. 现代雷达, 2002,24(2):71-75. (GAO Tie,WANG Jinyuan, JIN Lin. A novel method of failure compensation for 2-D solid-state active phased arrays[J]. Modern Radar, 2002,24(2):71-75.)
- [4] 牛传峰,吴旭,赵东贺. 相控阵天线阵元失效的影响分析及补偿[J]. 无线电通信技术, 2013,39(5):44-46. (NIU Chuanfeng, WU Xu,ZHAO Donghe. Influence of failed elements on phased array antenna and its compensation[J]. Radio Communications Technology, 2013,39(5):44-46.)
- [5] 常立新,韩国栋. 部件失效对有源相控阵天线性能的影响分析[J]. 电子科技, 2014, 27(2):71-74. (CHANG Lixin,HAN Guodong. Effect of sub-system failure on performance of active phased array antenna[J]. Electronic Science and Technology, 2014,27(2):71-74.)
- [6] 王永攀,杨江平,武高卫,等. 阵面分布不均匀的相控阵天线维修优化模型[J]. 系统工程与电子技术, 2016,38(4):767-772. (WANG Yongpan,YANG Jiangping,WU Gaowei,et al. Maintenance optimal model for asymmetrical phased array antenna[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016,38(4):767-772.)
- [7] 陈曦,杨龙,吴丹,等. 幅相误差对阵列天线相位中心的影响分析[J]. 电波科学学报, 2016,31(6):1195-1201. (CHEN Xi, YANG Long,WU Dan,et al. Effect analysis of amplitude and phase error on phase center of array antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016,31(6):1195-1201.)
- [8] ZHU Xiangwei,LI Yuanling,YONG Shaowei,et al. A novel definition and measurement method of group delay and its application[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009,58(1):229-233.
- [9] 秦顺友,张志华,陈辉. 用矢量网测量导航天线群时延的方法[J]. 河北省科学院学报, 2015,32(4):41-44. (QIN Shunyou, ZHANG Zhihua,CHEN Hui. Methods for measuring navigation antenna group delay using vector network analyzer[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2015,32(4):41-44.)
- [10] 吴春邦,杨文丽,刘波. 导航卫星天线相位及时延测试[J]. 空间电子技术, 2009,6(1):92-96. (WU Chunbang,YANG Wenli, LIU Bo. The measurement of antenna phase center and time delay[J]. Space Electronic Technology, 2009,6(1):92-96.)
- [11] 朱旭东. 系统绝对群时延测量的研究[J]. 现代雷达, 2006,28(11):75-80. (ZHU Xudong. Study of measurement for absolute group delay[J]. Modern Radar, 2006,28(11):75-80.)
- [12] 刘涛. 群时延的快速测量方法[J]. 电波科学学报, 2009,24(2):369-371. (LIU Tao. Fast method of group delay measurement[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009,24(2):369-371.)
- [13] 孙元,胡欣,廖鹏,等. 24 GHz 微带阵列天线设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(4):640-645. (SUN Yuan, HU Xin,LIAO Peng,et al. Design and implementation of 24 GHz microstrip antenna array[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(4):640-645.)
- [14] 陈腾博,焦永昌,张福顺. 一种宽频带圆极化微带天线的设计[J]. 空间电子技术, 2006,3(3):61-64. (CHEN Tengbo,JIAO Yongchang,ZHANG Fushun. The design of broad band circularly polarized microstrip antenna[J]. Space Electronic Technology, 2006,3(3):61-64.)
- [15] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1988. (ZHANG Guangyi. Phased array radar system[M]. Beijing: Defense Industry Publishing House, 1988.)

作者简介:



陈腾博(1979-),男,安徽省淮北市人,高级工程师,博士,主要研究方向为相控阵天线阵列综合技术研究 .email:c_t_b210@sina.com.

杜海龙(1974-),男,内蒙古自治区包头市人,高级工程师,博士,主要研究方向为相控阵天线幅相校正技术研究.

江涛(1985-),男,山东省潍坊市人,工程师,硕士,主要研究方向为天线与微波产品设计.