

多分辨率复合数字阵列天线的设计与实验

唐玥 毛天* 江冰

(河海大学物联网工程学院 常州 213022)

摘要: 稀布阵列天线具有简化阵列结构、降低系统成本的优点, 基于数字波束形成的稀布阵列天线技术获得了广泛地关注。基于作者所提出的多分辨率复合阵列天线技术(MRCA), 该文设计了一个多分辨率复合数字阵列天线, 并应用该阵列天线来进行单目标和双目标检测实验。仿真和实验结果均表明: 与传统的均匀直线阵列天线相比, 在相同的阵列天线单元数目的情况下, 多分辨率复合数字阵列天线可以得到更窄的主波瓣和更低的副瓣, 增强了阵列天线系统的方向性, 提高了角度分辨率。

关键词: 稀布阵列天线; 多分辨率复合数字阵列天线; 目标检测

中图分类号: TN957.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2016)03-0265-06

DOI: 10.12000/JR16005

引用格式: 唐玥, 毛天, 江冰. 多分辨率复合数字阵列天线的设计与实验[J]. 雷达学报, 2016, 5(3): 265–270. DOI: 10.12000/JR16005.

Reference format: Tang Yue, Mao Tian, and Jiang Bing. Design and experiment of multi-resolution composite digital array antenna[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(3): 265–270. DOI: 10.12000/JR16005.

Design and Experiment of Multi-resolution Composite Digital Array Antenna

Tang Yue Mao Tian Jiang Bing

(Department of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Because a sparse array has the advantages of a simplified structure and reduced cost in a radar system, radar technology based on the sparse array has gained widespread attention. To take advantage of the sparse array, in this paper, we designed a Multi-Resolution Composite digital Array antenna (MRCA), and then used it in single-target and multi-target detection experiments. Using the same number of array elements, our experimental results demonstrate that the MRCA can obtain a narrower main lobe and a lower side lobe, enhances the direction of the array antenna, and improves the angular resolution compared with the uniform linear array.

Key words: Sparse array; Multi-resolution composite digital array antenna; Target detection experiments

1 引言

目前, 智能天线的核心技术之一是数字波束形成技术。数字波束形成技术具有精度高、可编程、可重构等优点^[1], 可以在数字领域内动态地形成所需的各种波束^[2]。在认知无线电领域, 已有学者将

数字波束形成技术用于各处, 例如干扰控制^[3]、最大化信道容量^[4]、SINR均衡^[5]等。

相对于已被广泛研究的稀布阵列天线模型, 基于多个天线子阵输出信号合成的复合稀布阵列天线模型能获得较高的稀疏率和较低的旁瓣, 其在雷达系统中的运用与研究获得了越来越多的关注^[6,7]。其中, 比较经典的是由D.G. Tucker介绍的基于两个天线子阵的输出信号相乘的乘法阵列(Multiplicative Array, MA)技术^[8]。MA技术最初应用于射电天文侦测, 后被广泛应用在方向图特定方向上形成极窄的零点^[9–11]。L. C. Stange和C. Metz等人第1次将MA技术应用于设计大孔径稀布

收稿日期: 2016-01-07; 改回日期: 2016-02-23; 网络出版: 2016-04-06

*通信作者: 毛天 15051966860@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501172), 中央高校基本业务费项目(2015B04514)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501172), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015B04514)

阵列天线数字波束雷达,在维持一定的雷达成像效果前提下,相较于传统天线阵削减了很多天线单元,极大地降低了数字波束雷达的成本和系统复杂性^[12]。尽管如此,基于MA的数字波束雷达存在着多目标分辨能力不足的缺点,这极大地限制了其在数字波束雷达领域的应用。

与MA技术相比,本文所提出的基于多分辨率复合数字阵列(Multi-Resolution Composite digital Array, MRCA)天线技术在同等指标下能更多地减少阵列天线单元的数目,节约了成本;或者在相同阵列天线单元数下取得更宽的多目标分辨区域,提高了角度分辨率。

除了单一频率或频段前提下的复合稀疏阵列天线模型,基于多个天线子阵不同频率或频段输出信号的复合稀疏阵列天线方法也受到重视^[13]。通过对稀疏阵列天线子阵在不同频率信号下形成的数字波束方向图进行方向图综合的方法,有效地降低了该稀疏阵列天线的副瓣。此外,该复合稀疏阵列天线的子阵波束宽度也被用于抑制稀疏全阵的远区栅瓣和副瓣,十分适合航空或航天等空间有限前提下的雷达应用。由于不需要昂贵的多频段收发组件,本文所介绍的MRCA更加适用于低成本高方向性雷达应用领域。

2 多分辨率复合阵列天线技术及其设计

2.1 多分辨率复合阵列天线技术

MRCA技术的基本原理就是运用不同半功率波束宽度(Half Power Beam Width, HPBW)的数字波束来扫描整个空域,然后通过数字波束形成,合成窄波束,能够不以方向图变坏为代价获得高稀疏率。MRCA的基本结构如图1所示,可以由位于一条直线上的一个半波长均匀子阵和数个均匀稀疏子阵结合而成。所有这些子阵都是对称结构,并且它们的相位中心位于MRCA的中心^[14,15]。每个子阵都单独进行数字波束形成,而复合阵列的高分辨率和栅瓣抑制是通过所有子阵的数字波束形成结果相乘而获得的。

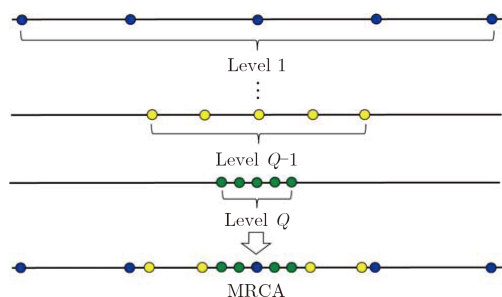


图 1 MRCA 结构图

Fig. 1 Structure of MRCA

为了保证高角分辨率和高稀疏率,第1级子阵应具有较大的孔径和较少的单元数。为了获得宽角度的侦测范围,最后一级子阵应该在观测角范围抑制栅瓣。因此,第1级子阵为大孔径稀疏均匀直线阵,最后一级子阵为半波长单元间距的小孔径均匀线性阵列,其他子阵为介于两者之间的稀疏均匀直线阵。每个子阵的孔径和单元间距的选择将影响复合阵列天线的方向图性能和波束扫描范围,其具体设计方法将于下一节介绍。

2.2 多分辨率复合阵列天线的设计

多分辨率复合阵列天线的设计过程是从第1层到第Q层的,设计步骤如图2所示。

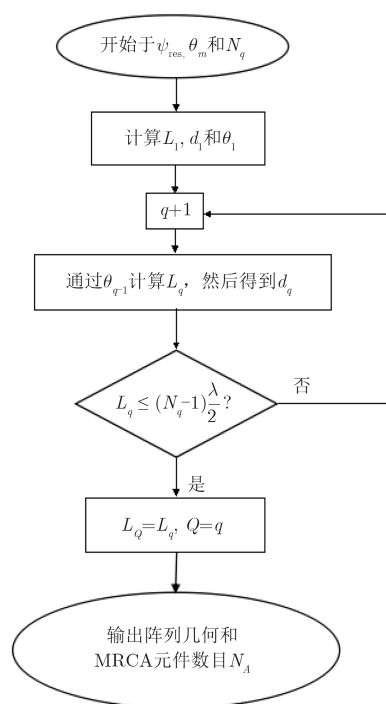


图 2 MRCA 的设计步骤

Fig. 2 Design steps of MRCA

步骤1 从第1层开始,如果给定角分辨率 ψ_{res} , λ 是波长,整个稀疏阵列的孔径 L_1 可以由式(1)给出:

$$L_1 = \frac{2.782\lambda}{2\pi \sin\left(\frac{1}{2}\psi_{res}\right)} \quad (1)$$

该阵列的单元间距 d_1 取决于最大多目标鉴别角 θ_m ^[15],由式(2)给出:

$$d_1 = \frac{\lambda}{\sin\frac{\theta_m}{2}} \quad (2)$$

因此,第1层阵列的单元个数 N_1 可以由式(3)给出:

$$N_1 = \frac{L_1}{d_1} + 1 \quad (3)$$

其它层的阵列，单元数目 N_q 应该首先给出，并且至少大于3，不同的 N_q 将影响整个MRCA的数目。

步骤2 第 $q(q \geq 2)$ 层的角分辨率 ψ_q 要比 $q-1$ 层的最大多目标鉴别角 θ_{q-1} 小：

$$\theta_{q-1} = 2\arcsin \frac{\lambda}{d_{q-1}} \quad (4)$$

如果设定第 q 层阵列的角分辨率为 $\psi_q = 0.5\theta_{q-1}$ ，那么第 q 层的阵列孔径 L_q 和单元间距 d_q 可分别由式(5)和式(6)给出：

$$L_q = \frac{2.782\lambda}{2\pi \sin\left(\frac{1}{4}\theta_{q-1}\right)} \quad (5)$$

$$d_q = \frac{L_q}{N_q - 1} \quad (6)$$

如果 $L_q \geq (N_q - 1)\lambda/2$ ， q 加1，并且重复步骤2，直到 $d_q \leq \lambda/2$ 为止。最后第 Q 层，令 $Q = q$ ， $L_Q = (N_q - 1)\lambda/2$ ，整个MRCA单元的数目 N_A 就可以由式(7)给出：

$$N_A = N_1 + (Q - 1)N_q - Q + 1 \quad (7)$$

上面提及的多分辨率天线阵列设计方法是较为简便的人工设计方案，并不是最佳设计方法。尽管如此，在阵列天线层数较少时，该人工设计方案比

较容易得到符合设计要求的多分辨率阵列天线结构，并依此来搭建阵列天线，测试和验证多分辨率复合数字阵列天线理论。

3 多分辨率复合数字阵列天线实验设计

3.1 实验设计及仿真

根据2.2节所描述的多分辨率复合阵列的设计方法，设计好了多分辨率复合阵列中每一层子阵天线单元的数目以及天线单元之间的间隔。实验中采用的多分辨率复合阵列天线参数的设置和空间分辨率如表1所示，为与其作对比，具有相等天线单元数量的半波长均匀直线阵列天线的参数与空间分辨率也在表1中给出。

实验系统设计的空间分辨率为小于 8° ，因受到实验条件的限制，只设计了具有3层子阵的MRCA，每一层子阵包含了5个接收天线单元。因所有子阵的相位中心都位于MRCA的中心，所以位于相位中心的天线单元被3个子阵重复使用，即实验中实际采用天线单元数为13个。因此本实验中作为对比的半波长均匀直线阵列天线(Uniform Linear Array, ULA)单元数也为13个。

图3(a)为13单元半波长间距ULA波束形成仿真结果。图3(b)为MRCA每一层子阵波束形成仿真结果，从图3(b)中可以看到，第1层子阵产生的波束图主瓣最窄，栅瓣数量最多，是因为其天线单元之

表 1 ULA和MRCA阵列结构配置表
Tab. 1 Configuration table of ULA and MRCA array

类	第1层			第2层			第3层		
	天线个数 N_A	阵元间距 d/λ	空间分辨 率(度)	天线个数 N_A	阵元间距 d/λ	空间分辨 率(度)	天线个数 N_A	阵元间距 d/λ	空间分辨 率(度)
ULA	13	0.5	8.46	-	-	-	-	-	-
MRCA	5	4.0	3.17	5	1.5	8.46	5	0.5	25.58

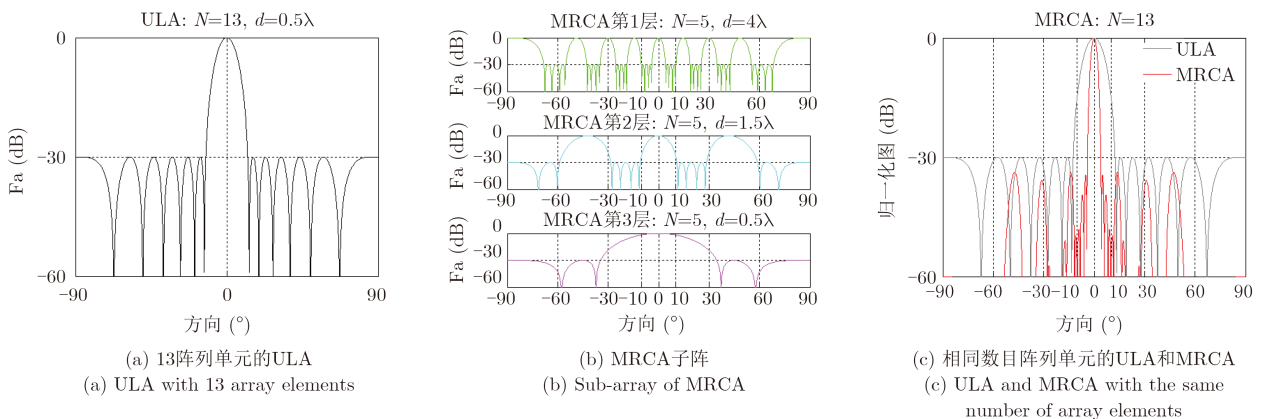


图 3 数字波束形成结果

Fig. 3 Digital beamforming results

间的间距比较大($d=4\lambda$)。第2层子阵产生了数目较少的栅瓣,因为其天线单元之间的间隔相对于第1层较小($d=1.5\lambda$)。第3层子阵产生的波束图主瓣较宽,没有产生栅瓣,其天线单元之间的间隔为半个波长($d=0.5\lambda$)。仿真和下文的实验过程中,MRCA每一层子阵和ULA的波束形成中均采用了副瓣电平为-30 dB的切比雪夫加权系数,该加权系数通过输入天线单元数和目标副瓣,按切比雪夫加权系数算法计算获得。

这3层子阵的方向图相乘后产生的MRCA阵列方向图与相同天线单元数的ULA作比较,其结果如图3(c)所示。当天线单元个数相同时,MRCA产生的波束图的主瓣宽度远小于ULA,并且二者都没有产生栅瓣,说明了在天线单元数相同的情况下,基于MRCA的数字波束系统具有更高的角度分辨率。相对于传统的均匀直线阵列,基于多分辨率复合阵列技术能够提高数字波束系统的角度分辨率。

3.2 实验过程及结果分析

本实验的验证系统框图如图4所示。硬件系统包括一台E5071C型矢量网络分析仪(VNA),一台装有labview和matlab软件的笔记本电脑,两个相同的X波段锥形喇叭天线(一个作为发射天线,一个作为接收天线),两个角反射器(实验过程中充当目标),两根电缆。整个实验的硬件系统实物图如图5所示。笔记本电脑通过通用接口总线(General Purpose Interface Bus, GPIB)与网络分析仪相

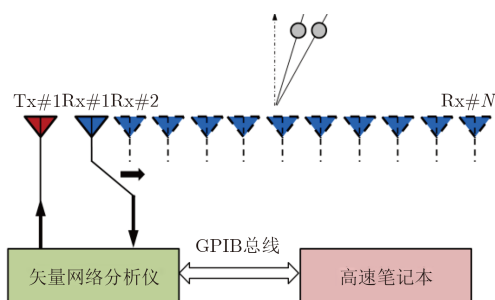


图 4 MRCA 数字波束系统实验验证系统框图

Fig. 4 Verification system figure of MRCA digital beam system experiment



图 5 MRCA 数字波束系统实验硬件系统实物图

Fig. 5 Hardware system figures of MRCA digital beam system experiment

连,在电脑上使用labview程序控制网络分析仪发射的电磁波信号的频率和带宽,使用matlab程序进行数据处理。网络分析仪的Tx端和Rx端通过两根电缆分别与两个喇叭天线相连接。

本实验中,设定网络分析仪的Tx端发射信号的扫描频率为5.0~5.5 GHz,信号频率的带宽为0.5 GHz,信号经过发射天线放大后发射出去,接收天线接收来自角反射器反射回来的回波信号。记录的S21数据不仅可以用来确定目标的距离,还可以用来做数字波束形成处理。电脑通过labview来控制整个实验过程。由于受到实验条件的限制,实验过程是固定目标和发射天线不动,移动接收天线,将天线在不同位置接收到的信号转为数字信号存储起来,最后通过数字波束形成的方式获得阵列天线的方向图。

首先,进行单个目标精确定位实验。当放置一个目标在 90° ,3.6 m时,MRCA每一层子阵的检测结果与执行数字波束形成后的检测结果如图6所示。

从图6可以看出,第1层和第2层子阵对单个目标进行检测时,均出现了假目标。而第3层子阵检测时,没有出现假目标,但由于该层子阵角度分辨率较低,无法对目标精确定位。经过子阵综合处理后,能够清楚地得到单个目标的距离和角度信息,并且消除了假目标,说明基于MRCA的数字波束系统能够使用相同的天线单元获得更精确的单个目标位置信息。

然后进行等距离双目标角度分辨实验。当两个目标分别被放置在 87° 和 93° 时(4.8 m),MRCA每一层子阵的检测结果与经过数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)处理后的检测结果如图7所示。

从图7可以看出,第1层和第2层子阵对两个目标进行检测时,均出现了假目标。当第3层子阵进行检测时,无假目标,但由于该层子阵的角度分辨率较低,无法区分这两个目标。但是通过子阵综合处理后,消除了假目标并区分这两个目标,说明了基于MRCA数字波束雷达能够使用相同的天线单元区分近距离内的少量目标。

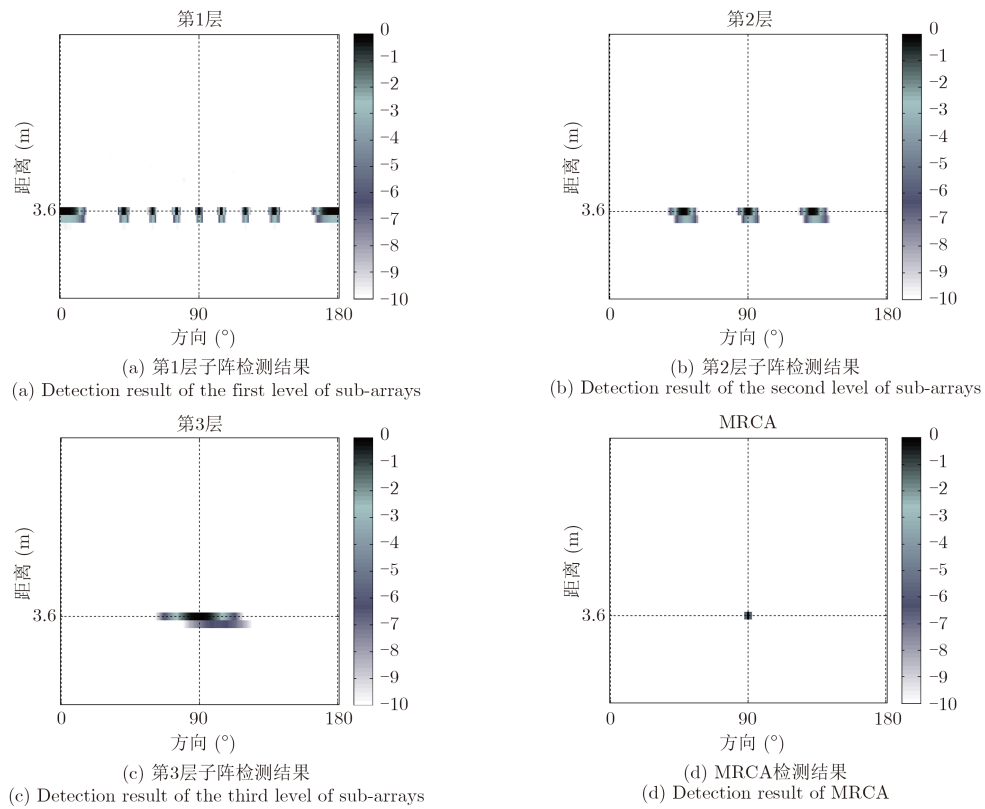


图 6 基于MRCA数字波束系统的单目标检测结果

Fig. 6 Detection result single target based on MRCA digital beamforming system

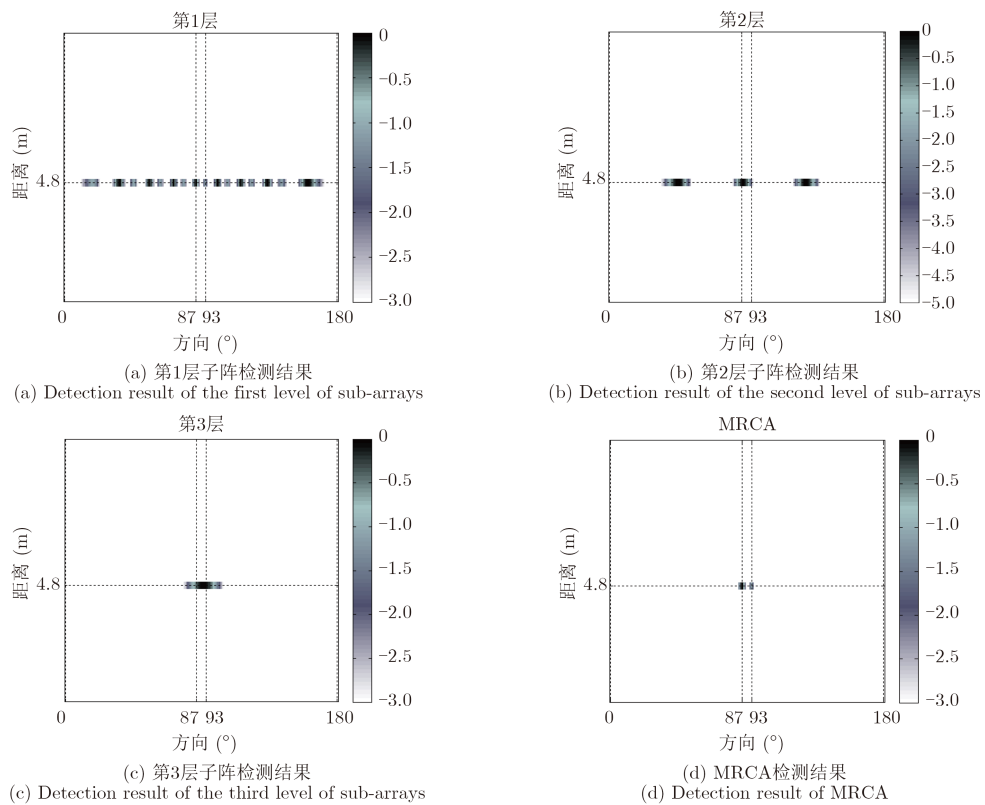


图 7 基于MRCA数字波束系统的双目标检测结果

Fig. 7 Detection result double targets based on MRCA digital beamforming system

4 结束语

本论文研究的是多分辨率复合数字阵列天线的设计与实验。相较于传统方法,本文所提出的方法既提高了系统的分辨率,又减小了系统的成本与复杂度。本文首先根据多分辨率复合阵列天线的理论模型,设计符合指标要求的阵列天线;其次搭建基于该多分辨率复合阵列天线的验证系统;最后,完成了对单目标和等距离双目标角度的检测与分辨。通过硬件实验和仿真实验验证了该系统的可行性。

参 考 文 献

- [1] 王峰,李婧,刘俊,等. 宽带数字阵雷达数字波束形成系统研究[J]. 雷达学报, 2013, 2(3): 314-318.
Wang Feng, Li Jing, Liu Jun, *et al.*. System realization of broadband digital beam forming for digital array radar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(3): 314-318.
- [2] 李学仕,孙光才,邵鹏,等. 基于数字阵列雷达的同时多模式 SAR成像体制研究[J]. 雷达学报, 2014, 3(4): 480-489.
Li Xue-shi, Sun Guang-cai, Shao Peng, *et al.*. Investigation on multimode SAR imaging based on digital array radar[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(4): 480-489.
- [3] Yiu S, Vu M, and Tarokh V. Interference and noise reduction by beamforming cognitive networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(10): 3144-3153.
- [4] Luan Tian-xiang, Gao Fei-fei, Zhang Xian-da, *et al.*. Rate maximization and beamforming design for relay-aided multiuser cognition networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(4): 1940-1945.
- [5] Cumanan K, Musavian L, Lambotharan S, *et al.*. SINR balancing technique for downlink cognitive radio networks[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(2): 133-136.
- [6] 胡航,邓新红. 子阵级平面相控阵SDBF的旁瓣抑制技术方法[J]. 电科科学学报, 2008, 23(1): 201-205.
Hu Hang and Deng Xin-hong. Sidelobe suppression method for ADBF at subarray level with planar phased array[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(1): 201-205.
- [7] 侯颖妮,李道京,尹建凤,等. 基于稀布综合孔径天线的艇载成像雷达研究[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2377-2382.
Hou Ying-ni, Li Dao-jing, Yin Jian-feng, *et al.*. Airship imaging radar based on aperture synthesis of thinned array[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(12): 2377-2382.
- [8] Welsby V G and Tucker D G. Multiplicative receiving arrays[J]. *Journal of the British Institution of Radio Engineers*, 1959, 19(6): 369-382.
- [9] MacPhie R H and Yoon T H. Grating lobes suppression with a thinned multiplicative receiving array[C]. Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, Suzhou, China, 2005: 3-4.
- [10] MacPhie R H. A mills cross multiplicative array with the power pattern of a conventional planar array[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Honolulu, HI, USA, 2007: 5961-5964.
- [11] Xu L, Song Q, Li C, *et al.*. Nulling antenna realised utilising a concept of multiplicative array[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(1): 8-10.
- [12] Stange L C, Metz C, Lissel E, *et al.*. Multiplicatively processed antenna arrays for DBF radar applications[J]. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 2002, 149(2): 106-112.
- [13] Li D J, Hou Y N, and Hong W. The sparse array aperture synthesis with space constraint[C]. EUSAR 2010, Germany, 2010: 1-4.
- [14] Tang Y and Lu Y. Multi-Resolution composite array for digital beamforming with high angular-resolution[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(8): 4377-4380.
- [15] Tang Y and Lu Y. A low cost radar digital beamforming concept with single receiver[C]. Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, Singapore, 2011: 1622-1625.

作 者 简 介



唐玥(1982-),男,江苏常州人,现为河海大学讲师,主要研究方向为数字波束雷达、天线与阵列天线、无线电定位等。

E-mail: tang0204@e.ntu.edu.sg



毛天(1993-),男,湖北咸宁人,现为河海大学硕士研究生,主要研究方向为智能信息处理。

E-mail: 15051966860@163.com



江冰(1960-),女,江苏常州人,现为河海大学教授,主要研究方向为电子与雷达通信、智能信息理论与技术、现代通信技术等。

E-mail: jiangb@hhuc.edu.cn