doi:10.11887/j.cn.201606030 http://journal.nudt.edu.cn

双频带圆极化紧凑型微带贴片阵列天线设计*

何 艳[1,2],邓长江[1],冯正和[1],杨 虎[2]
(1. 清华大学 电子工程系,北京 100084;2. 国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:利用旋转馈电方法设计双频带圆极化的微带贴片阵列天线。该阵列包括四个金属微带贴片单元与一个金属微带矩形环。每个贴片单元为侧边单点馈电的切角矩形,且关于中心旋转对称。矩形环被放置在阵列中心,与四个贴片单元通过四条微带线相连。该中心矩形环既充当了馈电网络,为阵列提供了产生圆极化波所需的递增相位,又参与了辐射,提高了阵列天线的辐射性能。由于采用了矩形环馈电贴片单元的方式,该阵列只需单层介质板,具有结构紧凑的优点,而且在两个频段内实现了圆极化辐射。经加工、制作并进行测试,该阵列的 -10 dB 阻抗带宽分别为 5.17 GHz ~ 5.59 GHz 和 5.99 GHz ~ 6.27 GHz,3 dB 轴比带宽分别为 5.19 GHz ~ 5.49 GHz 和 6.1 GHz ~ 6.18 GHz。

关键词:旋转馈电;双频带;圆极化;微带贴片阵列
中图分类号:TN95 **文献标志码**:A **文章编号**:1001 - 2486(2016)06 - 186 - 05

Compact dual-band circularly polarized microstrip patch array

HE Yan[1,2], *DENG Changjiang*[1], *FENG Zhenghe*[1], *YANG Hu*[2]
(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A dual-band circularly polarized patch array using a sequential-phase feeding network was presented. The array includes four metal patches and a metal square ring. Each rectangle patch was cut in diagonal corners, and was excited by feeding lines on the edge. The feeding lines are microstrip which are connected to the middle metal square ring. In addition, four patches are rotated arrangement. The middle mental square ring is not only a feeding network which provides increasing phase for circularly polarization, but also a radiator which enhances the performance of the array. With this feeding way, the patch array just has single-layer substrate and it is compact. In addition, it radiates circularly polarized patterns in two working bands. Through fabrication, test and measurement, the -10 dB impedance bandwidth of the patch array is 5.17 GHz ~ 5.59 GHz and 5.99 GHz ~ 6.27 GHz. The measured 3 dB AR bandwidth is 5.19 GHz ~ 5.49 GHz and 6.1 GHz ~ 6.18 GHz.

Key words: sequential-phase feeding; dual-band; circularly polarized; microstrip patch array

随着现代卫星通信的迅速发展,卫星天线的设计得到了越来越多的研究。由于圆极化波对天线极化不敏感,且在传播过程中受雨雾等因素干扰较小,因而被广泛用于卫星通信系统中。此外,卫星通信通常需要下行链路与上行链路以实现频分双工。双频天线为这类应用提供了较好的解决方案。一方面,它可以抑制带外的干扰,比宽带天线节省了滤波器;另一方面,它的两个频段带宽的调节较独立,可根据需求来确定上行链路和下行链路的带宽(下行链路一般比上行链路带宽要宽)。因此,研制双频圆极化天线不但可以使卫星通信实现收发天线一体,降低系统复杂度,而且减小了电磁兼容问题。

双频圆极化微带天线技术目前已有很多研究成果,最常用的方法是采用双层微带结构引入两个不同谐振频率的圆极化辐射单元[1-2],或者在单层微带结构上排布两个不同频率辐射圆极化单元[3]形成双频辐射,或利用单个天线多个工作模式来实现双频[4-5]。但这些传统方法设计的双频天线体积较大,剖面较高,不利于小型化设计。尤其当需要提高天线增益而组成阵列时,馈电网络又增加了天线结构的复杂度。旋转馈电是一种用来改善圆极化带宽特性的馈电方法[6-10],常用于宽带圆极化天线阵列,且往往采用多层介质板设计。

本文在已有文献旋转馈电设计方法的基础上

* **收稿日期**:2016 - 05 - 25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371012)
作者简介:何艳(1980—),女,湖南新邵人,博士研究生,E-mail:he-y12@mails.tsinghua.edu.cn;
冯正和(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:fzh-dee@tsinghua.edu.cn

加以变形,设计了一种双频带圆极化微带贴片阵列天线。该天线具有以下特点:①贴片单元采用对角线切角设计,并通过类似旋转馈电方式形成阵列的双频带圆极化辐射。②独特的天线馈线设计,阵列中心的方形金属环既为馈电装置又是一个圆极化辐射单元[11]。由于没有额外馈电结构,阵列结构紧凑,尺寸较小,且辐射增益较高。③与引用文献中提到的多层板设计相比,单层基板设计减小了天线设计复杂度。④近似旋转馈电方法改善了双频带每个频带内圆极化带宽特性,且两个频带的频率比仅为 1.15。

1　天线结构设计及工作原理

1.1　天线结构及尺寸

天线为 2×2 微带贴片阵列,其结构及尺寸示意图如图 1 所示。贴片位于单层基板上,基板两条边分别为 w_s 和 l_s,阵列采用旋转馈电设计,四个贴片单元摆放方向依次旋转 90°。其中每个微带单元贴片采用对角线切角设计,切角的直角边长为 w_c,并由侧边馈电,馈线长 l_t,宽度为 w_t。四个贴片中心为一个外边长为 l_h、宽度为 w_h 的矩形金属环,金属环四条边的中点分别连接上述四条馈线。金属环内有一个 L 形匹配支路,其中一条支路上开一个通孔,与同轴接头内导体相连,为系统馈电。同轴接头的外导体接地。该微带贴片阵列基板采用 Roger 5880,相对介电常数为 ε_r,厚度为 h。经过 Ansoft HFSS 仿真软件优化,该阵列天线各尺寸参数值详见表 1,加工实物照片如图 2 所示。

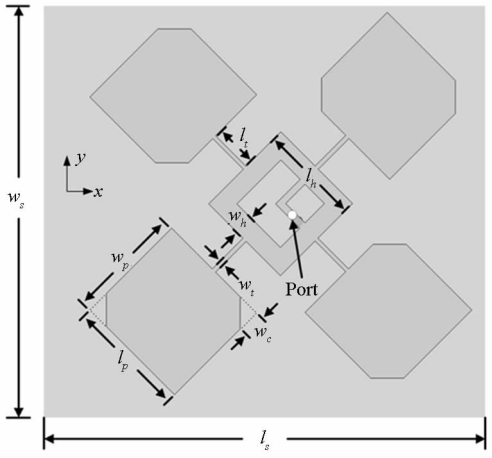


图 1　阵列天线结构及尺寸示意图

Fig. 1　Geometry and dimensions of the proposed patch array

表 1　阵列天线各尺寸参数值

Tab. 1　Detailed dimensions of the patch array

mm

参数	w_s	l_s	w_t	l_t	w_p	L_p
数值	70	70	0.6	6	16	16.5
参数	w_h	l_h	w_c	ε_r	h	
数值	2.8	14	3.2	2.65	1.5	

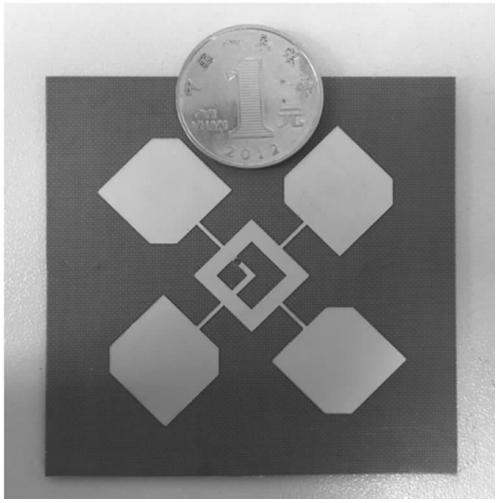


图 2　贴片阵列加工的实物照片

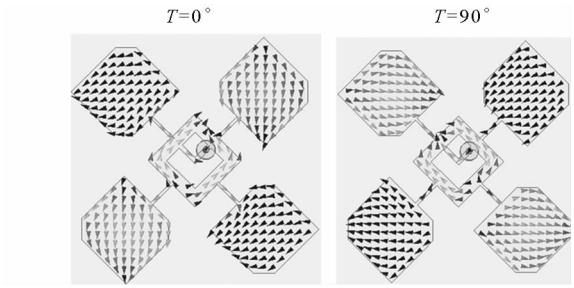
Fig. 2　Real photograph of the proposed patch array

1.2　天线工作原理

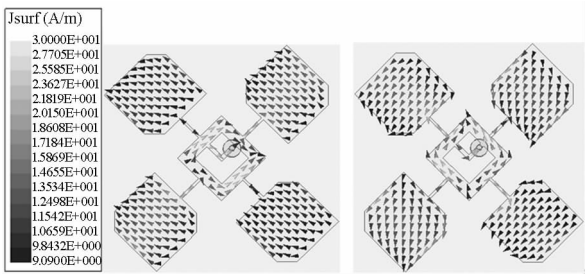
该阵列天线的贴片单元为对角线切角设计,即通过引入微扰 Δs,在矩形微带贴片天线上激励起 TM_{01} 模和 TM_{10} 模这两个辐射正交极化的简并模[12]。考虑到切角贴片的两条对角线长度不相等,两个对应的谐振频率也不同,该贴片单元的极化随工作频率的增加而呈现出线极化—圆极化—线极化的变化过程。这种极化状态的变化能有效扩展阵列的带宽。这是因为旋转馈电方式对各个单元的极化不敏感,它只需要矢量叠加的电场为圆极化。因此,通过选择合适的馈电方式,整个天线阵列在传播轴上有可能产生圆极化波[13]。

图 3 显示了三个不同频率点对应的 $T=0°$ 和 $T=90°$ 时刻阵列天线表面电流分布的仿真情况。其中左边是 $T=0°$ 时的电流分布,右边是 $T=90°$ 时电流分布。

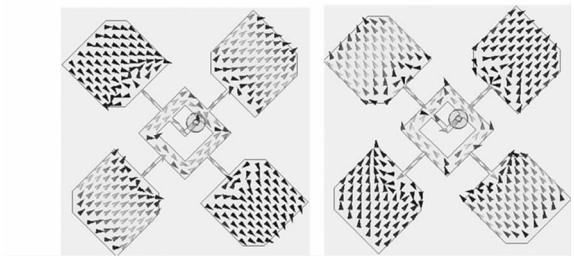
由图 3(a)可知,$T=0°$ 时,阵列中右斜线对角线两个微带贴片电流较强,处于主要工作状态;当 $T=90°$ 时,转换为左斜线对角线两贴片单元处于主要工作状态。而且 $T=0°$ 和 $T=90°$ 这两个时刻的主工作电流正交。因此,尽管四个单元工作在线极化模式,阵列的极化为圆极化波。图 3(b)中,四个微带贴片同时工作,且每个贴片单元均工作于圆极化模式。$T=0°$ 和 $T=90°$ 时,阵列整体



(a) $f=5.2$ GHz



(b) $f=5.5$ GHz



(c) $f=6.16$ GHz

图 3　$T=0°$和 $T=90°$时阵列天线表面电流分布仿真图

Fig. 3　Simulated current distributions on the patch array at $T=0°$and $T=90°$

电流旋转 90°,因而也是圆极化辐射。图 3(c)与图 3(a)的电流情况相似,亦为微带贴片单元工作在线极化模式,阵列为圆极化辐射。图 3(a)和图 3(c)的区别在于,图 3(a) 中单元的线极化主要由切角贴片的长对角线决定,工作频率较低,而图 3(c)中单元的线极化主要由切角贴片的短对角线决定,工作频率高。因此,适当增大切角将拉大长对角线和短对角线的谐振频率的间隔,从而使贴片阵列天线实现双频工作。

2　天线的仿真及测试

该微带阵列天线经仿真优化、加工制作及装配测试。

图 4 反映了该微带贴片阵列天线反射系数随频率变化的曲线。由图 4 可看出,测试结果与仿真结果基本吻合,为双频带工作。反射系数小于 −10 dB 的频带测量值分别为 5.17 GHz ~ 5.59 GHz 和 5.99 GHz ~ 6.27 GHz。第一个频带由贴片的长轴线极化和圆极化这两个模式提供,第二个频带由贴片的短轴线极化这一模式提供,因而第一个频带的带宽更宽。

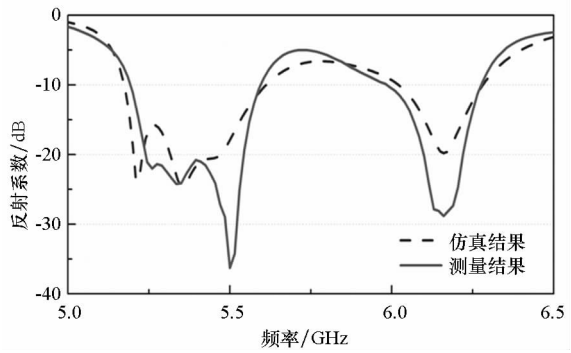


图 4　微带贴片阵列反射系数的仿真及测量曲线

Fig. 4　Simulated and measured reflection coefficients of the patch array

图 5 显示了该微带贴片阵列天线的仿真与实测的轴比带宽曲线。图 5 中实测轴比小于 3 dB 的频带范围分别为 5.19 GHz ~ 5.49 GHz 和 6.1 GHz ~ 6.18 GHz,均在反射系数小于 −10 dB 的有效阻抗带宽内。测量值与仿真值频率略有偏差,这与基板加工及介电常数偏差有关。

该微带贴片阵列天线在微波暗室中进行了测量,其辐射方向图及增益曲线的仿真结果和实测结果如图 6 和图 7 所示。

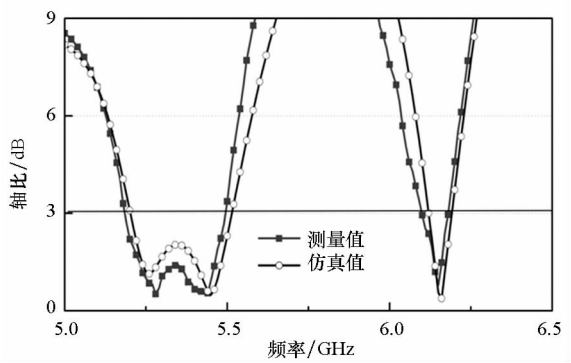


图 5　微带贴片阵列轴比的仿真及测量曲线

Fig. 5　Simulated and measured AR bandwidths of the patch array

图 6 中,标注为灰色的部分为贴片阵列 3 dB 轴比带宽范围。贴片阵列在该范围内实测的增益大部分高于 10 dB,且能看出随着贴片模式由线极化转为圆极化,阵列增益有所提高,当频率为 5.44 GHz 时,增益达到最大值 12.1 dB。这是由于此频率点微带贴片处于圆极化模式,四个微带贴片同时工作,均参与辐射(如图 3 所示)。

图 7 为微带贴片阵列天线在 *xoz* 面和 *yoz* 面上仿真和实测的归一化辐射方向图。图 7(a) ~ (c)三幅图分别对应频率 $f=5.3$ GHz,$f=5.5$ GHz

和f=6.16 GHz。由图 7 可看出该微带贴片阵列的最大辐射方向垂直于基板平面,形状基本对称,仿真和实测的阵列主极化(右旋圆极化)辐射吻合较好。f=5.5 GHz 时阵列交叉极化值略大于另外两个频率点的交叉极化值。这是由于此时四个微带贴片上的电流均较强,它们之间的互耦影响较大。

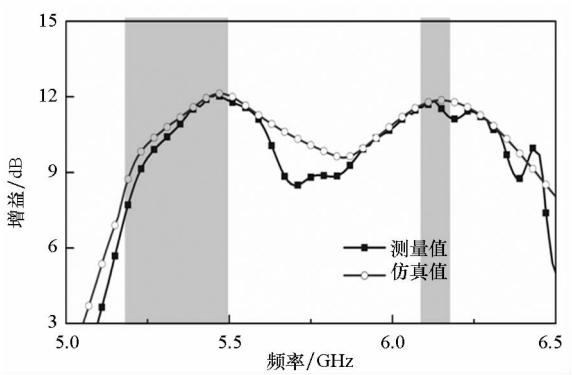


图 6　微带贴片阵列仿真及测量增益随频率的变化

Fig. 6　Simulated and measured gains of the patch array

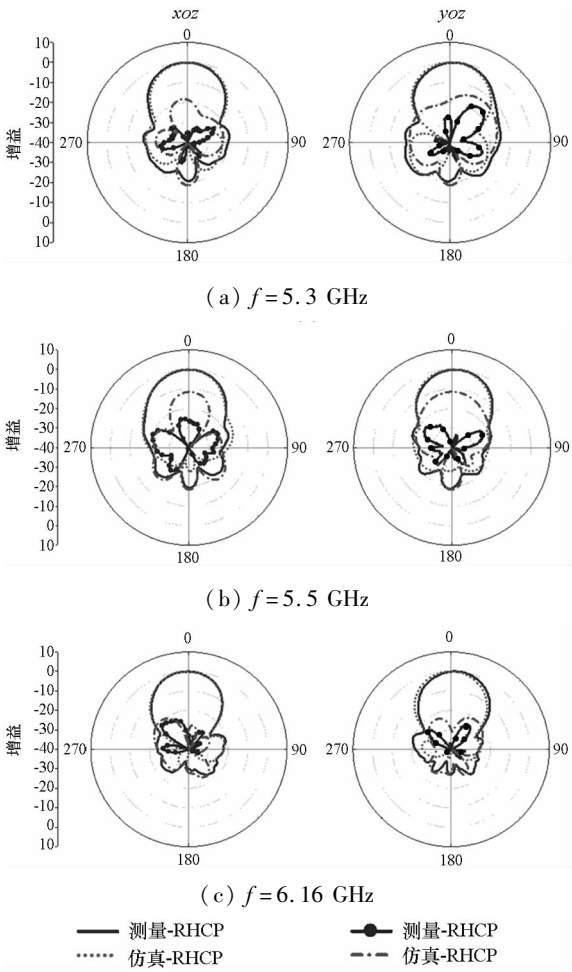


图 7　微带贴片阵列不同频率点上 *xoz* 和 *yoz* 面上的仿真及测量方向图

Fig. 7　Simulated and measured radiation patterns of the proposed patch array on *xoz*-plane and *xoz*-plane

为了研究中心环馈电的影响,图 8 将相同贴片单元的无中心矩形环馈电阵列与有该馈电结构(本文天线)的仿真增益随频率的变化进行了对比。由图 8 可看出,采用中心矩形环馈电可提高阵列天线在有效阻抗带宽内的增益,即该中心矩形环既充当了馈电网络,又改善了天线辐射能。

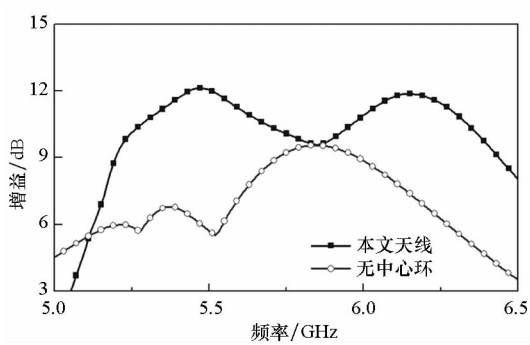


图 8　本文天线与无中心环馈电阵列的仿真增益变化

Fig. 8　Simulated gains of the proposed antenna and the patch array without mental square ring

3　结论

本文介绍了一种 2×2 双频带圆极化微带贴片阵列天线。阵列单元采用对角线切角设计,可工作于线极化—圆极化—线极化三种状态。阵列采用旋转馈电方式,使之整体形成圆极化辐射。其中长轴引起的线极化和圆极化模式构成第一个工作频带,短轴引起的线极化形成第二个工作频带。该天线经过加工测试,其实测的 -10 dB 阻抗带宽分别为 5.17 GHz ~ 5.59 GHz 和 5.99 GHz ~ 6.27 GHz,轴比小于 3 dB 的轴比带宽分别是 5.19 GHz ~ 5.49 GHz 和 6.1 GHz ~ 6.18 GHz,且当 f = 5.44 GHz 时,阵列拥有 12.1 dB 最大增益。该双频带圆极化贴片阵列只需单层介质板,具有结构紧凑、馈电简单、频率比小的优点,在卫星通信中具有较好的应用前景。

参考文献(References)

[1] Jan J Y, Wong K L. A dual-band circularly polarized stacked elliptic microstrip antenna [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2000, 24(5): 354 - 357.

[2] Boccia L, Amendola G, Massa G D. A dual frequency microstrip patch antenna for high-precision GPS applications [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2004, 3(1): 157 - 160.

[3] Qamar Z. Circularly polarized dual band microstrip patch antennas with multiple techniques[C]//Proceedings of 2011 4th Annual Caneus Fly by Wireless Workshop, IEEE, 2011: 1 - 4.

[4] Row J S. Dual-frequency circularly polarised annular-ring microstrip antenna[J]. Electronics Letters, 2004, 40(3):

153 – 154.

[5] Jung Y K, Lee B. Dual-band circularly polarized microstrip RFID reader antenna using metamaterial branch-line coupler[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 786 – 791.

[6] Hall P S, Dahele J S, James J R. Design principles of sequentially fed, wide bandwidth, circularly polarised microstrip antennas[J]. Microwaves Antennas & Propagation Iee Proceedings H, 1989, 136(5): 381 – 389.

[7] Kishk A A. Performance of planar four-element array of single-fed circularly polarized dielectric resonator antenna[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 38(5): 381 – 384.

[8] Janapsatya J, Nasimuddin, Esselle K P. Jawidening the bandwidth of single-fed circularly polarized microstrip patch antenna using sequential array[C]//Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008: 1 – 4.

[9] Rahardjo E T, Kitao S, Haneishi M. Circularly polarized planar antenna excited by cross-slot coupled coplanar waveguide feedline [C]//Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium, 1994, 3: 2220 – 2223.

[10] Deng C, Li Y, Zhang Z, et al. A wideband sequential-phase fed circularly polarized patch array[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2014, 62(7): 3890 – 3893.

[11] Li Y, Zhang Z, Feng Z. A sequential-phase feed using a circu-larly polarized shorted loop structure [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(3): 1443 – 1447.

[12] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
ZHONG Shunshi. Antenna theory and techniques [M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)

[13] Huang J. A technique for an array to generate circular polarization using linearly polarized elements [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1986, 34(9): 1113 – 1124.

(上接第 103 页)

[8] 尹航, 宋新, 闫野. 星图的稀疏表示性能[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 573 – 581.
YIN Hang, SONG Xin, YAN Ye. Performance on sparse representation of star images [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 573 – 581. (in Chinese)

[9] Song X, Yin H, Yan Y. Imaging method with low data rate for autonomous star trackers based on compressive sensing [J]. Journal of Electronic Imaging, 2015, 24(2): 023024 – 023024.

[10] 马坚伟, 徐杰, 鲍月全, 等. 压缩感知及其应用:从稀疏约束到低秩约束优化[J]. 信号处理, 2012, 28(5): 609 – 623.
MA Jianwei, XU Jie, BAO Yuequan, et al. Compressive sensing and its application: from sparse to low-rank regularized optimization [J]. Signal Processing, 2012, 28(5): 609 – 623. (in Chinese)

[11] Candès E J, Wakin M B, Boyd S P. Enhancing sparsity by reweighted l_1 minimization [J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 2008, 14(5): 877 – 905.

[12] Tropp J A. Greed is good: algorithm results for sparse approximation[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2006, 50(10): 2231 – 2342.

[13] Kim S, Koh K, Lustig M, et al. An interior point method for large-scale l_1 regularized least squares[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(4): 606 – 617.

[14] Figueiredo M A T, Nowak R D, Wright S J. Gradient projection for sparse reconstruction: application to compressed sensing and other inverse problems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(4): 586 – 598.

[15] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655 – 4666.

[16] Needell D, Tropp J A. CoSaMP: iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2009, 26(3): 301 – 321.

[17] 张广军. 星图识别[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
ZHANG Guangjun. Star identification[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)

[18] Shortis M R, Clarke T A, Short T. A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images[J]. SPIE Videometrics Ⅲ, 1994, 2350: 239 – 250.