

# Effects of Element Polarization Property on Performance of Sequentially-Rotated Circularly-Polarized Arrays

Daoyu Wang, Min Wang, Yuemin Wu, Wen Wu

JGMT Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu  
Email: wangmin@mail.njust.edu.cn

Received: Feb. 7<sup>th</sup>, 2017; accepted: Feb. 25<sup>th</sup>, 2017; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2017

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Sequentially-rotated (SR) arrays with elements having different polarization properties are studied in this paper. Linearly-polarized (LP) or circularly-polarized (CP) patches can both be used as elements of SR arrays, and have different effects on array performance. Two 2 by 2 SR arrays are constituted by LP and CP elements, respectively. Then, the bandwidth and gain performances of two arrays are studied. Theoretical analysis and simulation research are conducted. It is demonstrated that the arrays can broaden the bandwidth significantly. However, the gain of the SR array with LP elements is about 3 dB lower than that with CP elements, but gain bandwidth of the former array is wider. Finally, effects of the element spacing on SR arrays are studied with different polarized elements and the optimal spacing selection is analyzed.

## Keywords

Sequentially-Rotated Arrays, Polarized Elements, Bandwidth Performance, Gains Comparison, Spacing Selection

---

# 单元极化特性对顺序旋转圆极化阵列性能的影响

王道雨, 汪敏, 吴跃敏, 吴文

南京理工大学JGMT国防重点学科实验室, 江苏 南京  
Email: wangmin@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2017年2月7日; 录用日期: 2017年2月25日; 发布日期: 2017年2月28日

## 摘要

本文对采用不同极化单元的顺序旋转阵列进行了研究。顺序旋转阵列可以采用线极化或圆极化贴片作为单元, 且不同极化特性的单元对阵列性能有着不同的影响, 这里分别利用线极化单元和圆极化单元顺序旋转组阵, 构成 $2 \times 2$ 阵列, 研究了两种阵列的带宽及增益等性能。结合理论分析与仿真结果, 得出结论: 两种阵列均能很好地展宽带宽, 而采用线极化单元顺序旋转组阵的增益要比采用圆极化单元少将近3 dB, 但是前者的增益带宽要更宽。最后研究了采用不同极化单元时顺序旋转阵列间距对阵列性能的影响, 分析了最优间距的获取。

## 关键词

顺序旋转阵列, 极化单元, 带宽性能, 增益比较, 间距选择

## 1. 引言

顺序旋转馈电技术最早由 T. Teshirogi 等人提出, 该技术使得天线阵列拥有良好的圆极化带宽和驻波比带宽, 并且不受窄带单元的影响[1]。此后该技术得到国内外学者大量的研究。J. Huang 将线极化单元顺序旋转组成圆极化阵列[2], 同样获得了较宽的带宽特性, 但是该阵列增益较低且  $45^\circ$  方向的交叉极化较大, 文中提出通过组大阵列的方法, 使得对角方向的高交叉极化逐渐被平均。P. S. Hall 等通过一阶分析表明顺序旋转技术能提高轴比带宽[3]。同年, P. S. Hall 等人研究了顺序旋转馈电展宽带宽的应用[4], 分析并比较了不同阵元数和顺序旋转因子对天线性能的影响, 同时也发现增益损耗是一个重要的带宽限制。T. Zhang 等人分析了增益带宽限制的问题, 并提出了采用顺序旋转的椭圆极化单元来改善增益[5]。文献[6] [7] [8]中设计出各种各样的顺序旋转馈电网络以拓展带宽, 文献[9]则分析了不同顺序旋转馈电网络对天线各个性能的影响。

本文研究了单元极化特性对顺序旋转圆极化阵列性能的影响。分别利用线极化和圆极化贴片作为单元, 运用串馈网络得到  $0^\circ$ 、 $-90^\circ$ 、 $-180^\circ$ 、 $-270^\circ$  的  $2 \times 2$  顺序旋转阵列, 研究了两种阵列的带宽及增益等性能。最后分析了两种阵列的间距优选问题。

经过仿真与分析, 得出结论: 两种阵列在展宽阻抗带宽及轴比带宽方面具有相似的性能, 而采用线极化单元顺序旋转组阵的增益要比采用圆极化单元少将近 3 dB, 但是前者的增益带宽要更宽。对于圆极化单元顺序旋转组阵, 间距选择与传统阵列一致; 而对于线极化单元顺序旋转组阵, 间距应选得尽量小。

## 2. 不同极化贴片单元及顺序旋转阵列结构

分别采用如图 1(a)所示的线极化和圆极化贴片作为阵列的单元结构, 其中两个单元均取方形贴片以利于性能对照。通过调节两个单元的边长以产生谐振, 圆极化单元通过在贴片中央开缝以激励起两个正交的简并模, 形成右旋圆极化。

设计中心频率为 8.2 GHz。采用相对介电常数  $\epsilon_r = 2.2$ , 厚度  $t = 0.787$  mm 的介质基板 Rogers RT/duriod 5880。  $2 \times 2$  阵列结构如图 1(b)所示, 4 个贴片 1、2、3、4 按  $0^\circ$ 、 $-90^\circ$ 、 $-180^\circ$ 、 $-270^\circ$  顺序旋转



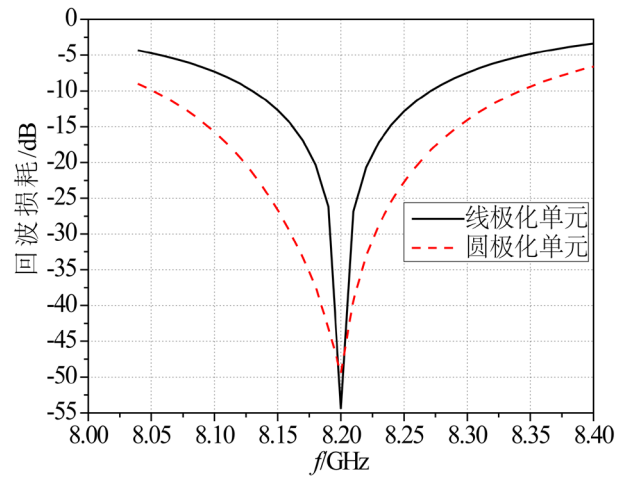


Figure 2. Curve: return loss of two elements

图 2. 两个单元的回波损耗曲线

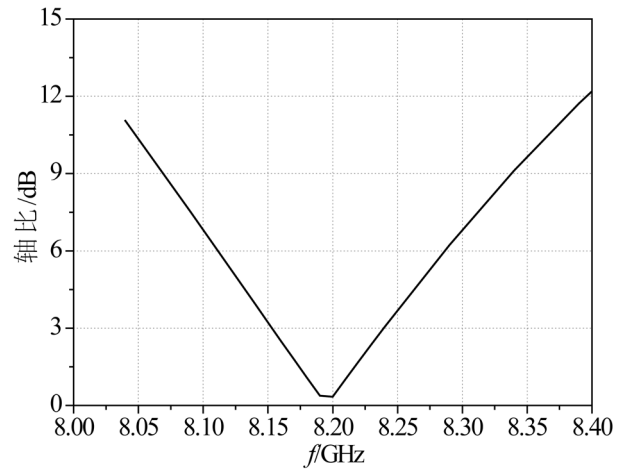


Figure 3. Curve: axial ratio of CP element versus frequency

图 3. 圆极化单元轴比随频率变化曲线

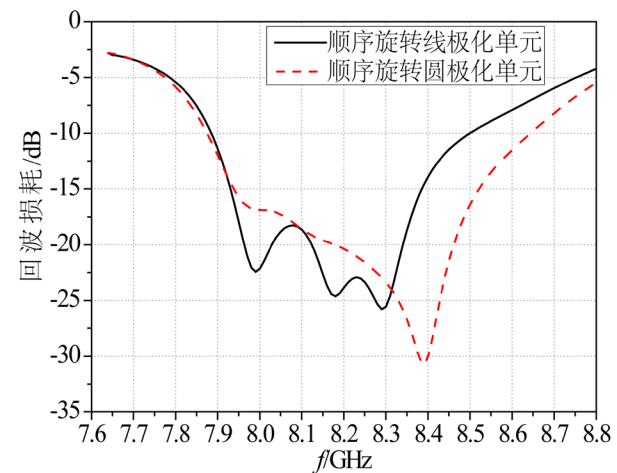


Figure 4. Curve: return loss of two arrays

图 4. 两种阵列的回波损耗曲线

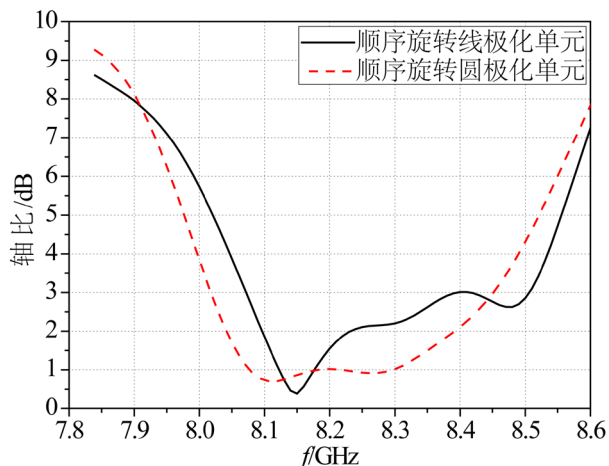


Figure 5. Curve: axial ratio of two arrays versus frequency  
图 5. 两种阵列的轴比随频率变化曲线

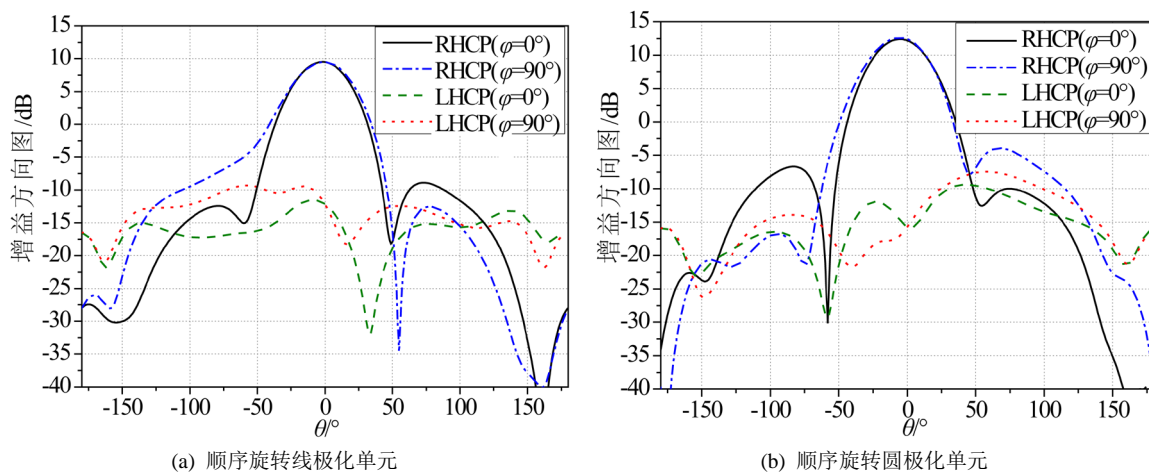


Figure 6. Radiation patterns of two arrays in the principal plane at 8.2 GHz  
图 6. 两种阵列 8.2 GHz 处主平面辐射方向图

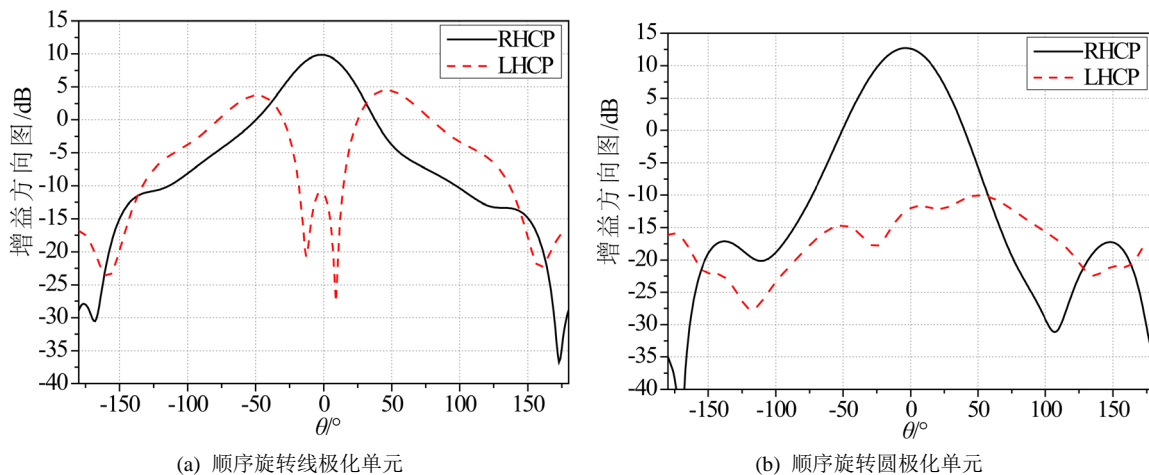
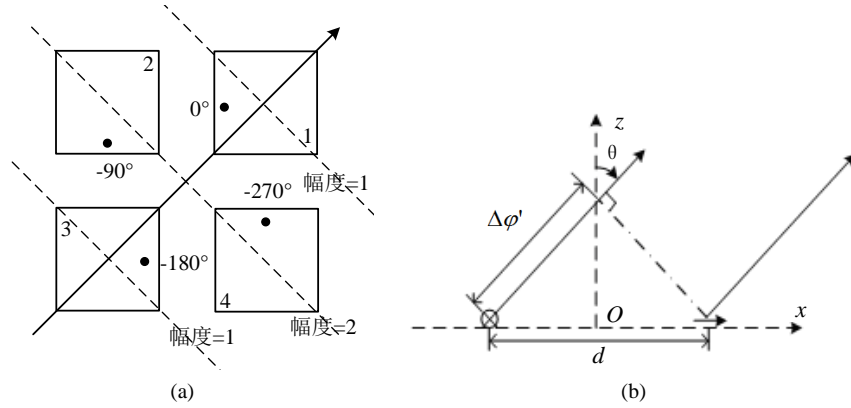


Figure 7. Radiation patterns of two arrays in  $\varphi = 45^\circ$  plane at 8.2 GHz  
图 7. 两种阵列 8.2 GHz 处  $\varphi = 45^\circ$  辐射方向图



**Figure 8.** (a) plane configuration at  $\varphi = 45^\circ$  (b) spatial phase delay  $\Delta\varphi' = k_0 d \sin\theta$

**图 8.** (a)  $\varphi = 45^\circ$  平面布局 (b) 空间相位延迟  $\Delta\varphi' = k_0 d \sin\theta$

在  $\theta = 0^\circ$  时，两垂直极化分量幅度相等，相位差  $90^\circ$ ，形成圆极化；但  $\theta$  偏离  $0^\circ$  时，水平极化两单元保持同相，场相互叠加，而垂直极化的两单元则由于如图 8(b) 所示的空间相位延迟产生了相差，造成叠加后与水平极化场分量幅度不平衡，同时也造成了两垂直场分量不再是预期的  $90^\circ$  相位差，这就造成了相位的不平衡。幅度和相位的不平衡使得  $\varphi = 45^\circ$  面上  $\theta$  偏离  $0^\circ$  方向产生了较高的交叉极化。在  $2 \times 2$  阵列中，由于该交叉极化比较大，就引起其阵列增益大大降低。

文献[2][10]指出当阵列规模较大的时候，因天线更窄的波束和大阵列的平均效果会使上述的不平衡抵消，从而可以抑制交叉极化。但是，规模相同的大顺序旋转阵列，单元的极化方式不同会对阵因子造成影响，影响副瓣电平，从而对增益和增益带宽产生影响。

## 2) 阵因子分析

这里结合轴比误差来分析顺序旋转阵列的阵因子。以椭圆极化单元为基础，阵列模型如图 9 所示。图中单元场被分解成两个正交分量， $I_1$ 、 $I_2$  分别是两分量的幅值。 $I_1$  分量在四个单元上的馈电相位依次为  $0$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/2$ 、 $2\pi$ ，垂直分量  $I_2$  的相位则为  $\pi/2 + \theta_e$ 、 $\pi + \theta_e$ 、 $3\pi/2 + \theta_e$ 、 $\theta_e$ ， $\theta_e$  用于表示两个模馈电相差偏离  $\pi/2$  的的误差。

忽略高次模和阵元间互耦的影响，经过推导，顺序旋转阵列的阵因子可以表示为[5]：

$$f(A_e, \theta_e) = 4 \left( \frac{1}{2} + \frac{A_e}{1 + A_e^2} \cos \theta_e \right) \quad (1)$$

式中振幅误差  $A_e = I_2/I_1$  且  $\in [1, \infty)$ ，相位误差  $\theta_e \in [0, \pi/2]$ 。

式(1)表明  $A_e$  和  $\theta_e$  分别影响着阵因子，对  $A_e$  和  $\theta_e$  各自求偏导数，可知阵因子在  $A_e \in [1, \infty)$  和  $\theta_e \in [0, \pi/2]$  内均单调递减。当阵元是纯圆极化单元时， $I_1 = I_2$ ， $A_e = I_2/I_1 = 1$ ， $\theta_e = 0$ ，则有  $f(A_e, \theta_e) = f(1, 0) = 4 = 6 \text{ dB}$ ；当阵元为线极化单元时， $I_1 = 0$ ， $A_e = I_2/I_1 = \infty$  或  $\theta_e = \pi/2$ ，则有  $f(A_e, \theta_e) = f(\infty, 0) = 2 = 3 \text{ dB}$  或  $f(A_e, \theta_e) = f(A_e, \pi/2) = 2 = 3 \text{ dB}$ 。

由此可见，采用线极化单元的顺序旋转阵列的阵因子极大值要比采用圆极化单元少接近  $3 \text{ dB}$ 。

综合上述的空间误差和馈电误差分析，可知在最大辐射方向  $\theta = 0^\circ$  上，采用圆极化单元时阵列中的四个圆极化单元在主模上始终处于同幅同相激励；而采用线极化单元时，四个顺序旋转的线极化单元是相位相差  $90^\circ$  的两组正交的线极化单元，完全同幅同相激励主模的是一对线极化单元，因而比圆极化单元组成的阵列增益要少将近  $3 \text{ dB}$ 。这也意味着两种阵列对组阵单元间距要求不同，本文将在下一节展开研究。

不同极化性质的单元，不仅影响顺序旋转阵列的增益，也对增益带宽造成影响。图 10 示出了采用两

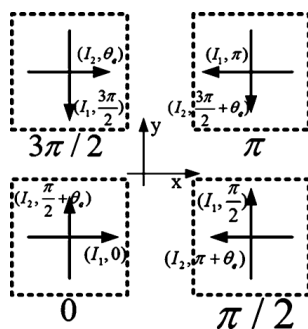


Figure 9. Theoretical model of SR array  
图 9. 顺序旋转阵列的理论模型

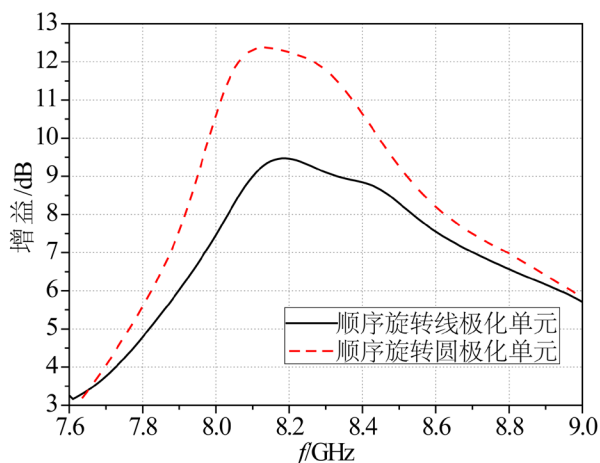


Figure 10. Curve: gain bandwidth of two arrays  
图 10. 两种阵列的增益带宽曲线

种单元的增益带宽曲线，从图中可以看出采用线极化单元组阵的增益带宽曲线比与采用圆极化单元更平缓，两种阵列 1 dB 增益带宽分别为 5.08% (8.06~8.48 GHz) 和 3.79% (8.02~8.33 GHz)。后者小于前者，表明采用圆极化单元的顺序旋转阵列虽然可以获得较高的增益，但是它的增益带宽却不能保持很宽；而采用线极化单元的顺序旋转阵列虽然增益低，但是它的增益变化却很平缓，增益带宽能保持得更宽。

文献[5]则指出采用介于线极化单元和圆极化单元之间的椭圆极化单元，可以使得顺序旋转阵列拥有最宽的增益带宽，这是因为线极化单元的阻抗带宽往往比较窄，导致增益带宽受到限制；而对于圆极化单元来说，窄的轴比带宽造成了增益带宽变窄。

## 5. 两种阵列间距的优选

由上一节可知：采用不同极化单元的顺序旋转阵列在同样的布阵形势下，等效的阵元间距不同。分别利用第 2 节中的线极化贴片和圆极化贴片作为单元，按照  $0^\circ$ 、 $-90^\circ$ 、 $-180^\circ$ 、 $-270^\circ$  的顺序旋转馈电方式组成  $2 \times 2$  右旋圆极化阵列，研究不加馈电网络情况下间距对两种阵列增益、口径效率、 $\varphi = 45^\circ$  交叉极化等参数的影响，这里间距  $d$  取 20~34 mm (约为  $0.55 \sim 0.93\lambda_0$ ， $\lambda_0 = 36.6$  mm)。

表 1 示出了不同极化单元组阵时不同阵元间距对天线增益、口径效率的影响。从表中可以看出圆极化单元组阵时，随着阵元间距逐渐增大，阵列增益和口径效率先增大后减小，当间距取 30 mm (约为  $0.82\lambda_0$ ) 时，增益达到最大值，当间距取 26 mm (约为  $0.71\lambda_0$ ) 时，口径效率达到最大。而线极化单元组阵时，随着阵元间距逐渐增大，增益缓慢增加，口径效率却在不断减小。

图 11(a)示出了圆极化单元组阵时  $\varphi = 45^\circ$  方向图, 可以看出不同间距下交叉极化特性(LHCP)保持得较好。图 11(b)示出了线极化单元组阵时  $\varphi = 45^\circ$  方向图, 可以看出不同间距下交叉极化特性(LHCP)较差, 但是随着间距的减小交叉极化电平逐渐降低, 因而采用较小间距可以将  $\varphi = 45^\circ$  面上的交叉极化抑制得更好。

事实上, 顺序旋转的圆极化单元在主模上始终处于同幅同相激励, 因此采用圆极化单元顺序旋转组阵的等效间距与传统的等幅同相阵列相同。而顺序旋转线极化单元, 等幅同相辐射的阵元是对角上的两个阵元, 该方向上的阵元间距为  $\sqrt{2}d$ , 更容易产生栅瓣, 并且  $\varphi = 45^\circ$  面上存在较高的交叉极化, 因此该阵列的阵元间距应尽量地减小。

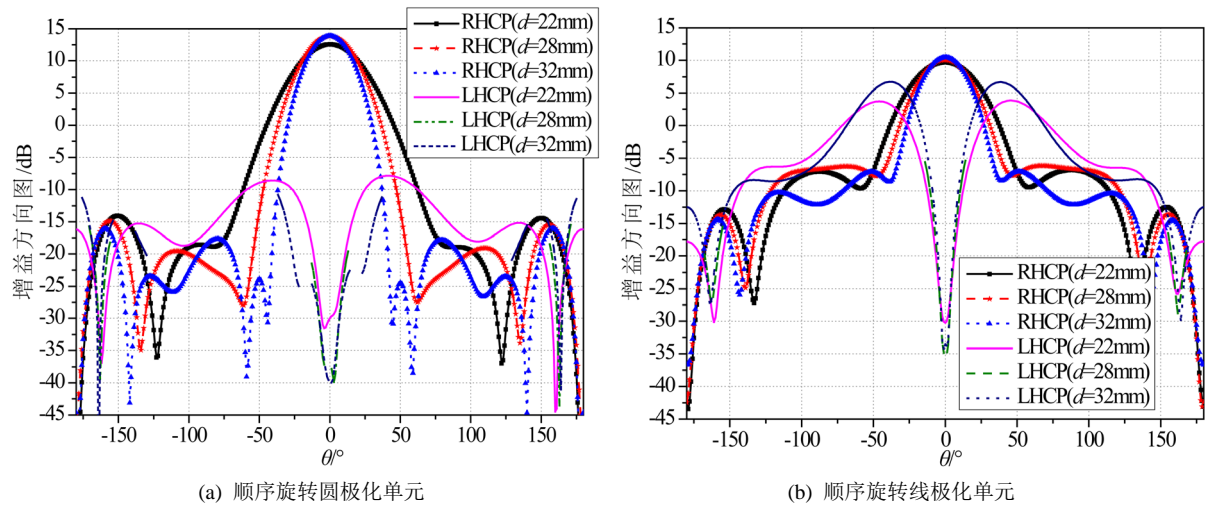
## 6. 应用

综合以上, 在实际应用中, 两种顺序旋转圆极化阵列均可以应用于宽频领域。其中采用圆极化单元的顺序旋转阵列拥有更高的增益, 因此更适合高增益的应用; 而采用线极化单元的顺序旋转阵列虽然增益低, 但是线极化单元的极化隔离度更高, 因此更适合双频双极化的应用。

**Table 1.** Effects of different spacings on the performance of two arrays

**表 1.** 不同间距对两种阵列性能的影响

间距 $d/\text{mm}$	增益/dB		口径效率/%	
	圆极化单元	线极化单元	圆极化单元	线极化单元
20	12.13	9.99	69.6	42.5
22	12.81	9.87	75.3	38.3
24	13.32	9.93	78.5	36.0
26	13.68	10.04	79.3	34.3
28	13.92	10.18	78.1	33.1
30	14.04	10.40	75.0	32.5
32	14.03	10.51	70.1	31.2
34	14.02	10.67	65.7	30.4



**Figure 11.** Radiation patterns of two arrays in  $\varphi = 45^\circ$  plane at 8.2 GHz

**图 11.** 两种阵列 8.2 GHz 处  $\varphi = 45^\circ$  辐射方向图



## 7. 结论

本文对比研究了采用不同极化单元的顺序旋转圆极化阵列。首先通过仿真比较了采用不同极化单元的阵列带宽，仿真结果表明两种阵列在展宽阻抗带宽及轴比带宽方面具有相似的性能。结合理论与仿真着重分析了采用两种极化单元的顺序旋转阵列的增益问题，同时比较了采用两种阵列的增益带宽，结果表明线极化单元顺序旋转组阵的增益比采用圆极化单元少 3 dB，而前者的增益带宽比后者要宽。最后分析了采用不同极化单元时的间距选择问题，指出对于圆极化单元顺序旋转组阵，间距选择与传统阵列一致；而对于线极化单元顺序旋转组阵，间距应选得尽量小，以尽可能地抑制  $\varphi = 45^\circ$  面上的交叉极化。

## 基金项目

国家自然科学基金青年基金项目：61401208。

## 参考文献 (References)

- [1] Teshirgoi, T., Tanaka, M. and Chujo, W. (1985) Wideband Circularly Polarized Array Antenna with Sequential Rotations and Phase Shift of Elements. *Proceeding of the International Symposium on Antennas Propagation*, Tokyo, Japan, August 1985, 136-139.
- [2] Huang, J. (1986) A Technique for an Array to Generate Circular Polarization with Linearly Polarized Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **34**, 1113-1124. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143953>
- [3] Hall, P.S., Dahele, J.S. and James, J.R. (1989) Design Principles of Sequentially Fed, Wide Bandwidth, Circularly Polarized Microstrip Antennas. *IEE Proceedings*, **136**, 381-389.
- [4] Hall, P.S. (1989) Application of Sequential Feeding to Wide Bandwidth Circularly Polarized Microstrip Patch Arrays. *IEE Proceedings*, **136**, 390-398.
- [5] Zhang, T., Hong, W. and Wu, K. (2015) Analysis and Optimum Design of Sequential-Rotation Array for Gain Bandwidth Enhancement. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **63**, 142-150. <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2367507>
- [6] Maddio, S. (2015) A Compact Wideband Circularly Polarized Antenna Array for C-band Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **14**, 1081-1084. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2392387>
- [7] Chen, A.X., Zhang, Y.J., Chen, Z.Z., et al. (2011) Development of Ka-Band Wideband Circularly Polarized 64-Element Microstrip Antenna Array With Double Application of the Sequential Rotation Feeding Technique. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **10**, 1270-1273. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2011.2175433>
- [8] Palmer, K.D., Cloete, J.H. and van Tonder, J.J. (1992) Bandwidth Improvement of Circularly Polarised Arrays Using Sequential Rotation. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 135-138. <https://doi.org/10.1109/aps.1992.221983>
- [9] Jazi, M.N. and Azarmanesh, M.N. (2006) Design and Implementation of Circularly Polarized Microstrip Antenna Array Using a New Serial Feed Sequentially Rotated Technique. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, **153**, 133-140. <https://doi.org/10.1049/ip-map:20050005>
- [10] Hall, P.S. and Huang, J. (1989) Gain of Circularly Polarized Arrays Composed of Linearly Polarized Arrays. *Electronics Letters*, **25**, 124-125. <https://doi.org/10.1049/el:19890091>

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ja@hanspub.org](mailto:ja@hanspub.org)