

· 光电工程系统技术 ·

## 大口径长焦距反射式偏瞳平行光管光学设计

吕保斌<sup>1,2</sup>, 李英才<sup>1</sup>, 马 臻<sup>1</sup>, 杨利华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**对共轴卡塞格伦(Cassegrain)系统和偏瞳 Cassegrain 系统进行对比分析并指出其缺点. 偏瞳 Cassegrain 系统的视场一般比较小, 为增大视场、提高像质, 提出将偏瞳两镜系统的次镜偏心 and 倾斜的方法, 并用矢量像差理论简单分析了含有偏心与倾斜元件的系统的初级像差. 结合实例分别设计出 2 种形式的光学系统. 对比设计结果可以看出: 该方法可以增大系统视场, 提高像质, 得到比较好的设计结果.

**关键词:**平行光管; 偏瞳; 非球面反射镜; 偏心与倾斜; 光学设计

中图分类号: O435.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)01-0013-05

## Optical Design of the Reflective Eccentric-pupil Collimator with Large-aperture and Long Focal Length

LV Bao-bin<sup>1,2</sup>, LI Ying-cai<sup>1</sup>, MA Zhen<sup>1</sup>, YANG Li-hua<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Science, Xi'an 710068, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The Eccentric-pupil two-mirror collimator is analyzed and its disadvantages are pointed out. The field view of eccentric-pupil two-mirror system is usually small. In order to enlarge field view and to improve image quality, a method of decentering and tilting the secondary mirror is introduced, the primary aberration of the system with decentered and tilted component is simply analyzed using the vector aberration theory. Two designs are given and compared, showing that the method presented could get a good design by enlarging system field and by improving image quality.

**Key words:** collimator; eccentric-pupil; aspheric mirror; decenter and tilt; optical design

大口径长焦距平行光管由于口径大、焦距长, 一般采用反射系统, 可以从紫外到红外较宽的波段内且无色差. 普遍采用结构简单的 Cassegrain 二反系统. 这类系统次镜对主镜有中心遮拦, 不仅损耗能量, 而且会降低系统低频部分的 MTF. 要改变这种情况, 一种途径是增大系统相对孔径. 而大相对口径、高精度光学元件加工非常困难. 另一个途径就是采用共轴偏瞳系统或离轴系统. 这 2 种系统次镜不遮挡主镜光线, 没有光能损耗. 在各国发射的空间相机中, 很多采用了离轴系统. 离轴系统各元件不同轴, 加工和装调也比较困难. 共轴偏瞳系统则具有长

焦距、宽视场、无遮拦、结构紧凑、加工装调相对容易等优点而被广泛采用.

## 1 理论分析

### 1.1 偏瞳两镜系统分析

偏瞳两镜系统的变量: 主、次镜顶点曲率半径、主、次镜非球面系数、次镜放大率、两镜间距. 偏瞳系统在设计中可以将像面倾斜作为一个变量. 对于偏瞳的 Cassegrain 系统, 主次镜顶点曲率半径和两镜

收稿日期: 2009-01-19

作者简介: 吕保斌(1983-), 男, 陕西人, 硕士研究生, 研究方向为光学工程。

间距确定系统光焦距,偏瞳量最小值取决于主镜顶点曲率半径和主次镜间距.考虑到次镜遮光罩,偏瞳量要相应增大.Cassegrain 系统主镜为抛物面,次镜为双曲面.系统可用于校正像差的变量只有次镜非球面系数和像面的倾角,最多校正球差和彗差.像散与视场成二次关系,随视场增大,像散迅速增大,系统像质下降很快.所以一般偏瞳 Cassegrain 系统只能在很小的视场内获得较好的像质.

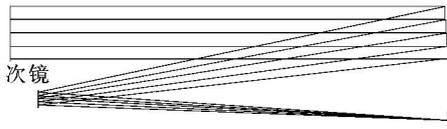


图 1 偏孔径两反系统光路图

要想扩大偏瞳两镜系统的视场,就要增加系统变量以校正其他轴外像差,一种方法是在像面前加入无光焦度校正组,以校正轴外视场像差.但引入透镜组会丧失反射系统无色差、宽波段的优点,并引入色差等不利因素.提出对次镜进行偏心与倾斜,从而在保持两镜系统结构简单、元件较少的前提下提高系统像质,增大视场.

### 1.2 倾斜与偏心对系统像差的影响

#### 1.2.1 矢量像差理论

国外对于包含偏心与倾斜元件系统的研究起步于 20 世纪 70 年代,Roland. V. Shack 教授针对含有倾斜与偏心元件的系统提出了矢量像差理论.该理论对包含偏心与倾斜元件的系统进行了分析并对元件偏心与倾斜对系统像差的影响有较深入的研究.

对于轴对称系统,第  $j$  面的三阶波前像差在极坐标下可以表示为

$$w_j(H, r, \varphi) = w_{040j}r^4 + w_{131j}Hr^3 \cos \varphi + w_{222j}H^2 r^2 \cos^2 \varphi + w_{220j}H^2 r^2 + w_{311j}H^3 r \cos \varphi \quad (1)$$

式(1)中,  $w_{040j}$ 、 $w_{131j}$ 、 $w_{222j}$ 、 $w_{220j}$ 、 $w_{311j}$  分别为第  $j$  面的球差、彗差数、像散数、场曲和畸变的三阶像差系数.  $H$ 、 $r$  为归一化的视场和瞳孔坐标,  $w_j$  是第  $j$  面波前与球面参考波前在出瞳处的光程差.在轴对称系统中,像面波前差是系统中各面的波前差在像面上叠加.三阶像差系统都只是  $j$  的函数,且都是关于视场中心对称的.

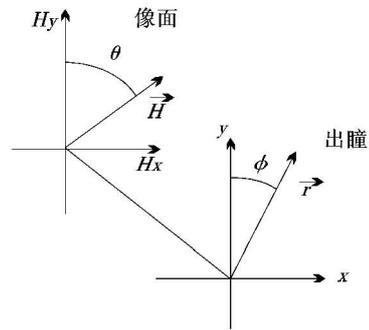


图 2 视场矢量和孔径矢量

系统中的视场矢量和孔径矢量如图 2 所示,角  $\theta$  和  $\phi$  都是从子午面测量.视场矢量和孔径矢量点积,可有

$$\vec{H} \cdot \vec{r} = Hr \cos(\theta - \varphi) \quad (2)$$

通过式(2),可将标量表示的第  $j$  面的三阶波前像差表示式转化为矢量表示

$$w_j(\vec{H}, \vec{r}) = w_{040j}(\vec{r} \cdot \vec{r})^2 + w_{131j}(\vec{H} \cdot \vec{r})(\vec{r} \cdot \vec{r}) + w_{222j}(\vec{H} \cdot \vec{r})^2 + w_{220j}(\vec{H} \cdot \vec{H})(\vec{r} \cdot \vec{r}) + w_{311j}(\vec{H} \cdot \vec{H})(\vec{H} \cdot \vec{r}) \quad (3)$$

对于具有偏心与倾斜元件的系统,像面波前差仍是各面波前差在像面上的叠加,也不会产生新的像差,但倾斜和偏心面的对称中心不再是视场中心,而是有一个偏移.如图 3 所示.

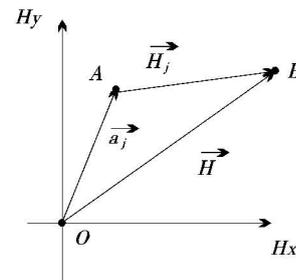


图 3 视场位移矢量

图 3 中,  $O$  点为轴对称系统的视场中心;  $A$  点为整个系统的对称中心;  $B$  点为最终像场中的场点;矢量  $\vec{H}$  为视场矢量,起始于高斯像面中心;矢量  $\vec{H}_j$  为有效视场高度,起始于第  $j$  面像差场对于整个系统的对称中心;矢量  $\vec{a}_j$  为视场矢量的偏移矢量,起始于视场中心,指向第  $j$  面像差场在像面上的对称中心.从图 3 可以看出

$$\vec{H} = \vec{H}_j - \vec{a}_j \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),得到具有偏心与倾斜元件系统的第  $j$  面波前像差矢量表示式

$$\begin{aligned} w_j(\vec{H}, \vec{r}) = & w_{040j}(\vec{r} \cdot \vec{r})^2 + w_{131j}[(\vec{H} - \vec{a}_j) \cdot \vec{r}] \\ & (\vec{r} \cdot \vec{r}) + w_{222j}[(\vec{H} - \vec{a}_j) \cdot \vec{r}]^2 + \\ & w_{220j}[(\vec{H} - \vec{a}_j)(\vec{H} - \vec{a}_j)](\vec{r} \cdot \vec{r}) + \\ & w_{311j}[(\vec{H} - \vec{a}_j)(\vec{H} - \vec{a}_j)] \cdot [(\vec{H} - \\ & \vec{a}_j) \cdot \vec{r}] \end{aligned} \quad (5)$$

系统像面的波前像差表示为

$$w = \sum_1^n w_j \quad (6)$$

式(6)中,  $n$  为系统中元件个数.

元件的倾斜和偏心,不会产生其他类型的像差,也不改变系统的三级像差系数和五级像差系数,但会改变偏心倾斜面的像差场在像面上的分布,从而改变像差对视场的依赖性<sup>[1-3]</sup>.

### 1.2.2 偏心与倾斜对系统初级像差的影响

#### (1) 对球差的影响

$$w = \sum_1^n w_{040j}(\vec{r} \cdot \vec{r})^2 \quad (7)$$

式(7)中没有视场矢量,元件的倾斜与偏心对球差没有影响.

#### (2) 对彗差的影响

$$w = \sum_1^n w_{131j}[(\vec{H} - \vec{a}_j) \cdot \vec{r}](\vec{r} \cdot \vec{r}) \quad (8)$$

从式(8)可以看出,元件偏心与倾斜使系统彗差对称中心在像面上相对于轴对称系统的视场中心产生矢量  $\vec{a}_j$  的漂移,如图 2 所示.

#### (3) 对像散和场曲的影响

$$w = \sum_1^n \{ w_{222j}[(\vec{H} - \vec{a}_j) \cdot \vec{r}]^2 + w_{220j}[(\vec{H} - \vec{a}_j)(\vec{H} - \vec{a}_j)](\vec{r} \cdot \vec{r}) \} \quad (9)$$

很多非对称光学系统像散函数展开式是计算相对于平均像散面的值而不是匹兹瓦面.相对于平均像散面,在霍普金斯符号表示法中,其平均场曲系数为

$$w_{220M} = w_{220} + \frac{1}{2} w_{222} \quad (10)$$

考虑  $\cos^2 \Phi$  与  $\cos \Phi$  之间的关系,式(9)整理为

$$w = \frac{1}{2} \sum_1^n [(\vec{H} - \vec{a}_j)^2 \cdot \vec{r}]^2 + \sum_1^n w_{220Mj}[(\vec{H} - \vec{a}_j) \cdot (\vec{H} - \vec{a}_j)](\vec{r} \cdot \vec{r}) \quad (11)$$

式(11)中,第一项为像散,第二项为平均场曲.

定义

$$\vec{A}_{222} = \sum_j w_{222j} \vec{a}_j; \vec{B}_{222}^2 = \sum_j w_{222j} \vec{a}_j^2 \quad (12)$$

将这 2 个矢量归一化

$$\vec{a}_{222} = \vec{A}_{222} / w_{222}; \vec{b}_{222}^2 = \vec{B}_{222}^2 / w_{222} - \vec{a}_{222}^2 \quad (13)$$

式(9)中的像散项即可整理为

$$w = \frac{1}{2} w_{222}[(\vec{H} - \vec{a}_{222})^2 + \vec{b}_{222}^2] \cdot \vec{r}^2 \quad (14)$$

$$\text{令 } (\vec{H} - \vec{a}_{222})^2 + \vec{b}_{222}^2 = 0$$

解得像面上像散为零的 2 个点的视场矢量为

$$\vec{H} = \vec{a}_{222} + i\vec{b}_{222} \quad (15)$$

Shack 教授经过研究发现偏心与倾斜系统的像散存在双零点现象,即包含偏心与倾斜元件系统的像散在像面上有 2 个零值点.其中一个零值点在视场中心,另一个零值点在像面上的位置与偏心和倾斜的量值有关.共轴系统像面中心像散为零,只是像散双零值点重合的一个特例.

将场曲的表达式整理得

$$\Delta w_{220} = \frac{1}{2} w_{220M}[(\vec{H} - \vec{a}_{220M}) \cdot (\vec{H} - \vec{a}_{220M}) + \vec{b}_{220M}^2] \quad (16)$$

式中,  $\vec{a}_{220M}$ 、 $\vec{b}_{220M}$  是与视场位移矢量有关的归一化矢量.偏心与倾斜元对场曲的影响如同彗差,也是相对于视场中心漂移.在轴向偏移  $w_{220} b_{220}$  距离.

## 2 系统设计实例

下面给出一个设计实例,分别设计出偏瞳两镜系统和将次镜偏心与倾斜的偏瞳两镜系统,对比设计结果.表 1 为设计要求.

表 1 设计要求

孔径 $\Phi$	900
焦距	30 000
像方线视场 $\Phi$	60
工作波段 $\lambda/(\mu\text{m})$	0.4~0.9
全视场波像差	$<0.05 \lambda$

共轴偏瞳两镜系统是在共轴两镜系统基础上将光瞳离轴优化而得到的.取次镜放大率  $\beta = -3$ ,焦点伸出量为零.考虑在某些情况下主镜构成牛顿式平行光管来用,确定主镜为抛物面<sup>[4]</sup>.用两镜系统理论求出共轴两反系统初始数据,再将入瞳偏离量设为 800 mm.偏瞳两镜系统初始数据如表 2 所示.

将此数据代入 Zemax 软件,发现成像质量并不好.在 Zemax 软件中将次镜的偏心与倾斜作为变量

表 2 共轴偏瞳两镜系统

主镜顶点曲率半径 $R_1$	-20 000
次镜顶点曲率半径 $R_2$	-7 500
主镜非球面系数 $e_1^2$	1
次镜非球面系数 $e_2^2$	3.985 9
两镜间距 $d$	7 499.999
偏瞳量/mm	800
像面与光轴夹角	1.566°

进行优化.优化后系统像质很好.

次镜倾斜,将引起像面沿垂轴方向偏离一定距离,像面与光轴的夹角也会改变.像面偏离的距离与次镜倾斜角度、次镜偏心距离和次镜与像面间距都有关系.

次镜偏心与倾斜操作使得在装调时比较困难,但系统像质提高,从而分配给加工和装调的误差就增加,公差分配相对放松.

将次镜偏心与倾斜前后 2 个系统的 MTF、点列图和波前 RMS error vs. field 进行比较,可以很明显地看到对次镜进行偏心与倾斜操作后系统像质提高很多,如图 4 所示.

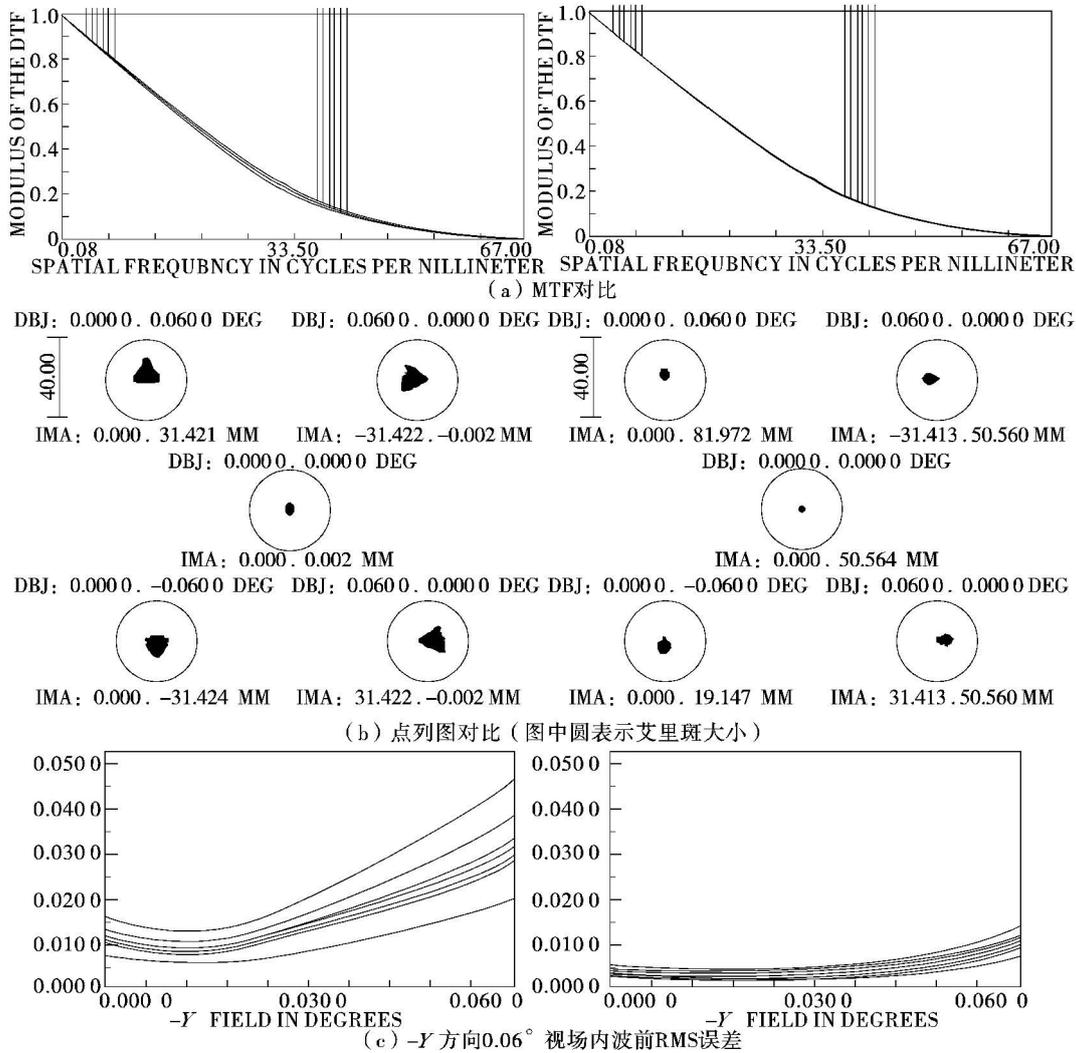


图 4 2 种系统的 MTF、点列图和波前 RMS 误差对比

从图 4b 点列图可以看出:用两镜理论解出的初始系统存在较大的彗差.对次镜进行偏心与倾斜处

理后,系统 MTF 达到衍射极限,各视场点列图减小很多,波前 RMS 误差减小很大,像质提高.

为考察此方法对系统视场的扩大能力,设置视场角  $2\omega = 0.21^\circ$ ,再次优化后系统 MTF、点列图和波前 RMS error vs. field 如图 5 所示.

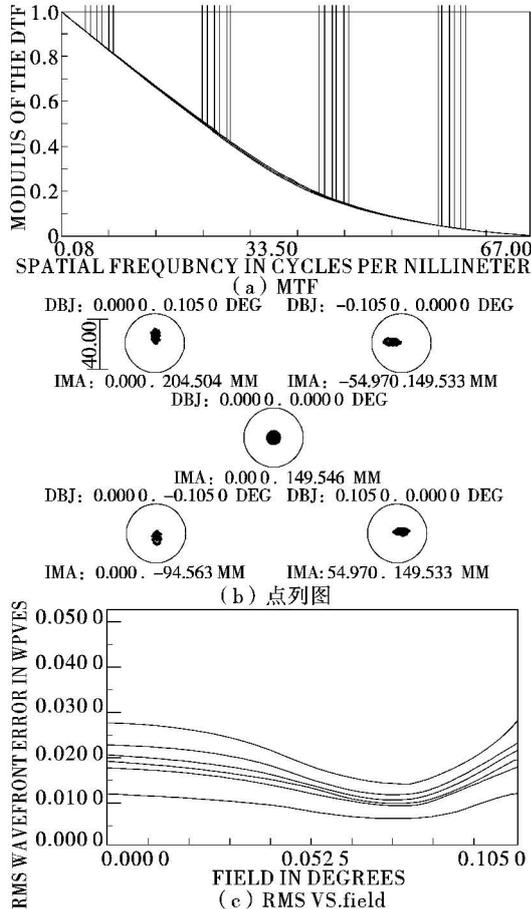


图 5 扩大视场后系统

同共轴偏瞳两镜系统相比,次镜偏心和倾斜后的系统有以下特点:

(1)在相同视场内,次镜偏心和倾斜处理之后,系统像质提高很多.MTF 达到衍射极限,点列图也

变小.在  $Y$  方向  $0.06^\circ$  视场,原系统 RMS 接近  $0.045\lambda$ ,而偏心与倾斜后系统 RMS 不到  $0.016\lambda$ .

(2)将  $Y$  方向视场角增大到  $2\omega = 0.21^\circ$ ,各视场 MTF 曲线基本达到衍射极限,点列图虽有所增大,但仍小于艾里斑.RMS 值不到  $0.03\lambda$ ,可以接受.

(3)光学系统像质提高,可留更多误差给加工与装调环节,使加工与装调公差相对放松.

### 3 结 论

上面的例子可以看出,通过对传统的偏瞳两反系统的次镜进行偏心和倾斜处理,可以有效提高系统成像质量,扩大视场.这种方法不引入辅助元件,保持了两反系统结构简单、元件较少的特点且消除了次镜对主镜的中心遮挡.由于次镜偏心、倾斜,使像面沿垂轴方有一定偏离,这些都会对加工和装调提出较高的要求.

对次镜进行偏心与倾斜的方法对于提高成像质量、增大视场的能力有限,要想在更大的视场获得更好的像质,必须引入辅助元件.

### 参考文献

- [1] Kevin Thompson. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. Opt. Soc., 2005, 22: 1389-1393.
- [2] Kevin Thompson. Practical methods for the optical design of systems without symmetry [J]. Spie, 1996, 2274: 2-12.
- [3] 杨新军,王肇圻,母国光,等.偏心和倾斜光学系统的像差特性[J].光子学报,2005,34(11):1658-1662.
- [4] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.
- [5] 吕保斌,王肇圻,母国光,等.偏心和倾斜光学系统的像差特性[J].光子学报,2005,34(11):1658-1662.
- [6] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.
- [7] 吕保斌,王肇圻,母国光,等.偏心和倾斜光学系统的像差特性[J].光子学报,2005,34(11):1658-1662.
- [8] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.
- [9] 吕保斌,王肇圻,母国光,等.偏心和倾斜光学系统的像差特性[J].光子学报,2005,34(11):1658-1662.
- [10] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.
- [11] 吕保斌,王肇圻,母国光,等.偏心和倾斜光学系统的像差特性[J].光子学报,2005,34(11):1658-1662.
- [12] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.
- [13] 吕保斌,王肇圻,母国光,等.偏心和倾斜光学系统的像差特性[J].光子学报,2005,34(11):1658-1662.
- [14] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.
- [15] 吕保斌,王肇圻,母国光,等.偏心和倾斜光学系统的像差特性[J].光子学报,2005,34(11):1658-1662.
- [16] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.
- [17] Kiermeier W, Biebl E. New dual-band Frequency Selective Surfaces for GSM frequency shielding[C]// European: Microwave Conference, 2007: 222-225.
- [18] Kim D H, Choi J I. Design of a Multiband Frequency Selective Surface[J]. ETRI Journal, 2006, 28(4): 506-508.
- [19] Parker E A, El Sheikh A N A. Convolved array elements and reduced size unit cells for frequency-selective surfaces[J]. Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H, 1991, 138(1): 19-22.
- [20] Parker E A, El Sheikh A N A. Convolved dipole array elements[J]. Electronics Letters, 1991, 27(4): 322-323.
- [21] Parker E A, El Sheikh A N A, Lima A C de C. Convolved frequency-selective array elements derived from linear and crossed dipoles[J]. Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H, 1993, 140(5): 378-380.
- [22] Barbagallo S, Monorchio A, Manara G. Small periodicity FSS screens with enhanced bandwidth performance [J]. Electronics Letters, 2006, 42(7): 382-384.

(上接第 12 页)