

成像系统均方根半径及调制传递函数的计算

张良忠¹, 金伟其², 周立伟²

(1. 北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044; 2. 北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘 要: 本文给出了逸出电子在最佳像面上落点的均方根半径值及直观图形表示; 以实际管型为例, η 分布取 1.8 至 2.1, 检验了均方根半径的变化状况, 证明了理论分析的正确性; 从数据上检验了均方根半径不仅可以表征系统鉴别率特性的好坏, 而且和调制传递函数的优劣在像面上是一一对应的; 证明了用指数形式表示系统的调制传递函数具有计算速度快、形式简洁、使用方便, 并且在低频空间具有足够的精度。

关键词: 均方根半径; 调制传递函数; 成像系统; η 分布; 数值计算

中图分类号: TN202 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 08-0005-04

Computation on Root Mean Square Radius and Modulation Transfer Function in Imaging Systems

ZHANG Liang-zhong¹, JIN Wei-qi², ZHOU Li-wei²

(1. Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Dept. of Photoelectronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In the paper, the value of RMS radius and the visual picture of escape electron dropped spots in optimum image plane has been given. The present paper has offered data to prove that when the η distribution changes from 1.8 to 2.1, the RMS radius value increases gradually, corresponding with theoretic analysis. It has offered data to check that the RMS radius not only can characterize the system resolution properties, but also does it correspond with the electron optical modulation transfer function (MTF) in image plane, and proved that expressing the system MTF by exponential function will have the properties of fast computation speed, succinct expression, convenient usage, and have enough accuracy in low frequency space.

Key words: root mean square radius; modulation transfer function; imaging systems; η distribution; numerical computation

1 引言

电子光学传递函数由于能综合评定宽电子束成像器件如变像管和像增强器等像质的像质, 在许多成像系统及软件包中被普遍采用。当前成熟的静电像管设计软件包(ODESD)是利用像差方程衍算轨迹落点, 并通过计算落点的概率平均值来确定 MTF。随着快速计算机及计算技术的发展, 直接追迹大量空间轨迹落点也已成为可能, 由此可计算系统均方根半径, 它为一具体数值, 因此作为辅助 MTF 的一个评价指标来表征系统鉴别率的特性, 将更为直观与方便。从物理意义和理论上分析来说, 均方根半径与传递函数的优劣在各个像面上是一一对应的, 均方根半径的大小正反映了逸出电子在像面上落点密集的程度, 而密集的电子落点必将使调制传递函数改善, 二者协调一致是很自然的。

本文通过直接追迹空间轨迹大量落点的方法, 来直接计算系统均方根半径, 进而近似计算调制传递函数(MTF), 从均方根半径的角度对系统像质作出评价。

2 系统均方根半径的计算及实例

2.1 系统均方根半径计算公式

若计算逸出角 θ_0 自 $0^\circ \sim 90^\circ$, 方位角 ϕ_0 自 $0^\circ \sim 360^\circ$, 初能量 E_0 自 $0 \sim E_{\max}$ 变化下系统的均方根半径 \bar{r} 值^[1]:

$$\bar{r} = \sqrt{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \quad (1)$$

$$\text{式中: } \sqrt{(\bar{x})^2} = \left\{ \sum_{m=1}^n (x_m)^2 (w_m / w_{\text{总}}) \right\}^{1/2}, \quad \sqrt{(\bar{y})^2} = \left\{ \sum_{m=1}^n (y_m)^2 (w_m / w_{\text{总}}) \right\}^{1/2}$$

其中 x_m, y_m 分别为以初能量 E_0 , 初角度 (θ_0, ϕ_0) , 自物点逸出且携带权数为 w_m 的电子, 在像面上的落点离理想像点在 x, y 方向的距离; n 是总落点数; w_m 为逸出电子对应的权, $w_{\text{总}}$ 为所有落点 w_m 之和。在计算中, 该值已归一化, 故令 $w_{\text{总}} = 1$ 。若假定光电子发射的初角度呈朗伯分布(Lambert), 即光电子以初角度 θ_0 逸出的几率是:

$$G(\theta_0) = \cos(\theta_0) \quad (2)$$

初能量遵循贝塔(*eta*) 分布,即:

$$N(i) = \sum_{k,l} N(k,l) = \frac{[(k+l+1)!]}{[k!l!]} k(1-\eta)^l \quad (3)$$
 式中 $\eta = 0/0_m$; $0_m = 0_{max}$ 为初电位最大值, k, l 可取 1, 2, ..., 8 中的任意值, 取决于实际需要.

为方便实际计算, 将逸出角 $0^\circ \sim 90^\circ$ 方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$ 初能量 $0 \sim 0_{max}$ 划分成若干等份, 则在 i_{j-1} 至 i_j 区间的单能区所对应的电子权数:

$$N(i) = \sum_{i=1}^i N(i) d = \sum_{i=1}^i \frac{[(k+l+1)!]}{[k!l!]} k(1-\eta)^l d \quad (4)$$

在此区间, 可取 i_{j-1}, i_j 的算术平均值作为代表值, 即取 $i = (i_{j-1} + i_j)/2$, 在此单能区计算轨迹, 取初电位 $i = i_m$.

综合初能量分布和初角度分布, 便可得到自阴极面上某一点发射出的所有电子中, 初电位在 $\eta \sim \eta + d$, 逸出角在 $\theta \sim \theta + d$, 方位角在 $\phi \sim \phi + d$ 之间发射的电子权数, 即电子分布函数:

$$w(\eta, \theta, \phi) = N(\eta) \sin^2 \frac{\theta}{2} d\eta d\theta d\phi \quad (5)$$

在进行实际计算时, 需将全色束划分为若干单能区, 此时对应于区间 $i_{j-1} \sim i_j$ 有确定的 $N(i)$, 所以在 $j_{k-1} \sim j_k$ 的角区间中发射的电子轨迹的权数, 即电子分布函数可表示为:

$$w(i, j, k) = N(i) (1/2) (\cos^2 j_{k-1} - \cos^2 j_k) (\eta - \eta_{k-1}) / (2) \quad (6)$$

式中: $i = (i_{j-1} + i_j)/2$, $j = (j_{k-1} + j_k)/2$, $k = (k_{l-1} + k_l)/2$

因此, 实际计算中的均方根半径计算公式可表示为:

$$r = \left\{ \sum_{m=1}^n (r_m)^2 w(i, j, k) / w_{总} \right\}^{1/2} = \left\{ \sum_{m=1}^n (r_m)^2 \frac{N(i) (1/2) (\cos^2 j_{k-1} - \cos^2 j_k) (\eta - \eta_{k-1}) / (2)}{w_{总}} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

式中, n 为总落点数 $(r_m)^2 = (x_m)^2 + (y_m)^2$, $w_{总} = 1$.

2.2 系统均方根半径计算实例

本文在大量管型计算的基础上, 以二代微光管 xx1380 及变倍管 xx1110 二个静电像管为例, 给出轨迹落点总数为 3600 点(取此总点数已经数据计算证明具有足够精度), *eta* 分布取 1.4 的均方根半径计算结果、轨迹落点直观示意图形, 及 1.1、1.2、1.3、1.4、1.8 和 2.1 时十个附加像面各自的均方根半径计算结果.

2.2.1 1.4分布下的均方根半径计算结果及轨迹落点示意图

2.2.2 eta 分布取各种分布时的均方根半径计算结果



图1 二代微光管 xx1380 均方根半径计算结果及轨迹落点示意图(3600 点)



图2 变倍管 xx1110 均方根半径计算结果及轨迹落点示意图(3600 点)

表1 二代微光管 xx1380 均方根半径计算结果(3600 点)

eta 分布/物高	均 方 根 半 径		
	2.75mm	5.50mm	8.25mm
2.1	0.0203341840	0.0252914633	0.0310653220
1.1	0.0182973834	0.0239064260	0.0290459799
1.2	0.0160652758	0.0224742993	0.0269322075
1.3	0.0137045848	0.0209275199	0.0247246252
1.4	0.0122850821	0.0198383354	0.0230862783
1.8	0.0094048459	0.0170924091	0.0188133583

表2 变倍管 xx1110 均方根半径计算结果(3600 点)

eta 分布/物高	均 方 根 半 径		
	5.50mm	11.0mm	16.5mm
2.1	0.0125836580	0.0334272367	0.0959302089
1.1	0.0116355145	0.0311012797	0.0887164974
1.2	0.0106301858	0.0286527981	0.0810691579
1.3	0.0096335114	0.0262787079	0.0736340439
1.4	0.0089485275	0.0245619438	0.0683637260
1.8	0.0073549818	0.0204074965	0.0559157921

表 1、2 给出了选择的二个管型各种不同 *eta* 分布下的均方根半径值. 由数据可以看出, 当 1.8 分布变到 2.1 分布时, 均方根半径值逐渐变大, 系统的鉴别率逐渐变坏, 这也将使系统传递函数特性逐渐变坏, 计算结果与理论分析完全一致.

2.2.3 1.4分布下的各附加像面处轴上及轴外均方根半径计算结果

从理论分析上而言, 均方根半径的大小与像面位置是密切相关的, 最佳像面位置处均方根半径值应最小. 而这一点一般是相对于轴上点的均方根半径值而言, 因为计算轴外均方根半径时由于场曲的存在使其大小与像面位置关系的比较与判断较为复杂. 由表 3、表 4 的数据可以看出, 在最佳像面位置附近轴上均方根半径值最小, 随着像面位置的变动均方根半径值变大, 这一点和理论分析是完全一致的. 但也应该看出, 由于确定最佳像面位置时本身方法或计算的误差, 最佳像面不一定就完全是最佳的像面位置, 这一点可以由 xx1110 管的轴上均方根半径值看出, 其最佳像面处的均方根半径值并不是最小的, 这也是合乎道理的. 从这一方面也可以看出, 利用均方根半径的大小来评价最佳像面则更为客观些. 在实际的像管设计中, 在计算出像管的最佳像面后, 取较为密集的附加像面, 通过追迹轨迹计算最佳像面及各附加像面处的均方根半径, 比较后取均方根半径最小处的像面作为最终的最佳像面, 即对最佳像面作一微调. 在此基础上再计算该像面处的各类像差及电子光学传递函数, 这样可使计算结果更为贴近

实际.

表 3 二代微光管 xx1380 均方根半径计算结果(z_m :最佳像面位置)

附加像面位置	轴 上 点	轴 外 点		
	0. 00 (mm)	2. 75 (mm)	5. 50 (mm)	8. 25 (mm)
$z_m - 0. 5$ (mm)	0. 0086378549	0. 0118097362	0. 0210674917	0. 020935362
$z_m - 0. 4$ (mm)	0. 0081095297	0. 0117462014	0. 0207296484	0. 0212631298
$z_m - 0. 3$ (mm)	0. 0076708976	0. 0117630895	0. 0204359956	0. 0216449803
$z_m - 0. 2$ (mm)	0. 0073380607	0. 0118600569	0. 0201884617	0. 0220781021
$z_m - 0. 1$ (mm)	0. 0071258587	0. 0120351681	0. 0199887601	0. 0225595423
z_m (mm)	0. 0070452008	0. 0122850821	0. 0198383354	0. 0230862783
$z_m + 0. 1$ (mm)	0. 0071005712	0. 0126053504	0. 0197383142	0. 0236552843
$z_m + 0. 2$ (mm)	0. 0072888705	0. 0129907708	0. 0196894647	0. 0242635868
$z_m + 0. 3$ (mm)	0. 0076002250	0. 0134357374	0. 0196921678	0. 0249083069
$z_m + 0. 4$ (mm)	0. 0080203161	0. 0139345471	0. 0197464021	0. 0255866917
$z_m + 0. 5$ (mm)	0. 0085330994	0. 0144816370	0. 0198517455	0. 0262961361

表 4 变倍管 xx1110 均方根半径计算结果(z_m :最佳像面位置)

附加像面位置	轴 上 点	轴 外 点		
	0. 00 (mm)	5. 50 (mm)	11. 0 (mm)	16. 5 (mm)
$z_m - 0. 5$ (mm)	0. 0037412074	0. 0069957532	0. 0223467522	0. 0658729231
$z_m - 0. 4$ (mm)	0. 0034797457	0. 0073771007	0. 0227891200	0. 0663709601
$z_m - 0. 3$ (mm)	0. 0032537343	0. 0077637426	0. 0232318422	0. 0668690603
$z_m - 0. 2$ (mm)	0. 0030710101	0. 0081549258	0. 0236748990	0. 0673672222
$z_m - 0. 1$ (mm)	0. 0029396561	0. 0085500271	0. 0241182719	0. 0678654446
z_m (mm)	0. 0028667424	0. 0089485275	0. 0245619438	0. 0683637260
$z_m + 0. 1$ (mm)	0. 0028567474	0. 0093499924	0. 0250058988	0. 0688620653
$z_m + 0. 2$ (mm)	0. 0029103193	0. 0097540557	0. 0254501220	0. 0693604611
$z_m + 0. 3$ (mm)	0. 0030240818	0. 0101604075	0. 0258945997	0. 0698589122
$z_m + 0. 4$ (mm)	0. 0031916049	0. 0105687838	0. 0263393190	0. 0703574176
$z_m + 0. 5$ (mm)	0. 0034049629	0. 0109789586	0. 0267842678	0. 0708559759

3 系统 MTF 的计算及实例

3.1 系统 MTF 计算方法及公式

对传递函数的计算,传统由直接追迹轨迹或像差方程作衍算的方法确定轴外物点的点扩散函数 PSF,进而将单色 PSF 对能量分布作概率统计,得全色 PSF,再对之进行 Fourier-Bessel 变换,得全色 MTF;或对单色 PSF 进行 Fourier-Bessel 变换,得单色 MTF,再将它对初能分布求概率平均值,得全色 MTF. 另外,若以指数函数形式:

$$T(f) = \exp [- (f)^2] \tag{8}$$

来近似表达阴极透镜的 MTF,形式简洁,在低频空间下,具有

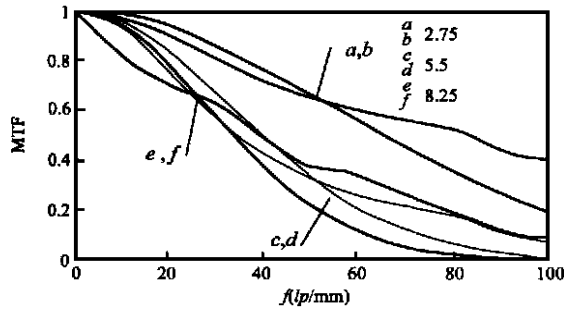


图 3 xx1380 管 MTF 曲线

足够的精度,而其中 即像差均方根半径. 为从实际系统的计算来验证上述结论,本文针对大量管型,由上文计算的均方根半径值折算到阴极面上来直接近似计算电子光学调制传递函数,并与传统方法计算所得的 MTF 值相对照^[2~4],这里给出二代微光管 xx1380 及变倍管 xx1110 物高为视场 25 %、50 %、75 %处二种方法计算的 MTF 曲线.

3.2 系统 MTF 计算实例及像质评价

3.2.1 系统 MTF 计算实例

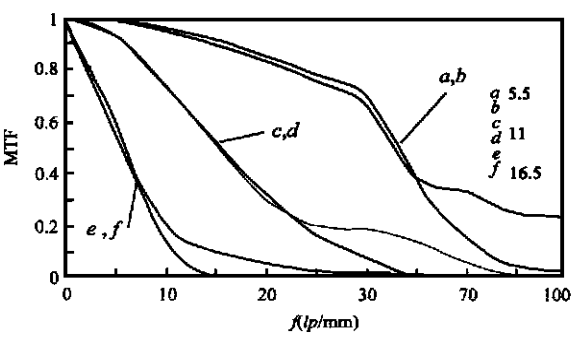


图 4 xx1110 管 MTF 曲线

3.2.2 系统像质评价

直接追迹轨迹计算系统均方根半径,进而计算系统 MTF,

由上述选择的管型计算结果可以看出:利用均方根半径计算 MTF 有一定的误差,但在低频空间下计算数据及曲线较为吻合;由于只需追迹一定量的轨迹落点,且均方根为一数值,由其出发计算 MTF 具有计算速度快、形式简洁、使用方便、且在低频空间具有足够的精度等优点,因此利用均方根半径辅助评价系统像质亦不失为一种较好的方法。

4 结论

由以上的计算数据及讨论可以得出如下结论:

(1) 对实际静电像管, η 分布取 1.8 至 2.1, 均方根半径值逐渐变大, 计算数据检验了理论上的分析, 证明了理论分析的正确性;

(2) 通过对各附加像面处的均方根半径计算, 提出对计算出的最佳像面利用均方根半径计算结果作一微调, 在此基础上计算系统的各类像差及电子光学传递函数, 可以提高计算精度; 可以预见, 这对电子光学系统的优化可能带来较大益处;

(3) 从数据上检验了均方根半径不仅可以表征系统鉴别率特性的好坏, 而且和调制传递函数的优劣在像面上是一一对应的; 证明了用指数形式表示系统的调制传递函数具有计算速度快、形式简洁、使用方便, 并且在低频空间具有足够的精度。

参考文献:

- [1] 周立伟, 艾克聪, 方二伦. 成像系统的电子光学调制传递函数与均方根半径的研究[J]. 北京工业学院学报, 1982, 3: 36 - 51.
- [2] 倪国强, 周立伟, 方二伦. 电子光学成像系统全色点扩散函数的研究[J]. 北京工业学院学报, 1988, 8(1): 31 - 42.
- [3] Ni Guoqiang, Zhou Liwei, Fang Erlun. On the determination of polyenergetic point spread function and modulation transfer function in electron optical imaging systems using three dimensional coordinates [J]. Acta Armamentarii Sinica, 1989, 1: 77 - 86.
- [4] Zhou Liwei, Zhang Zhiqian, Ni Guoqiang, et al. On modulation transfer function of cathode lenses in image tubes [J]. Photoelectronic Image Devices, 1991, 121: 405 - 419.

作者简介:



张良忠 博士后, 于 1991 年和 1994 年在大连理工大学物理系获理学学士及工学硕士学位, 1997 年于北京理工大学光电工程系获工学博士学位, 同年入北方交通大学光波技术研究所博士后流动站。现从事光纤技术研究工作。

2001 International Conference on Wireless Internet Technologies

CALL FOR PAPER

The 2001 International Conference on Wireless Internet Technologies (WI 01) will be held in the Fall of the first the new millennium. WI 01 will be organized by IT-3G wireless of Delson Group in cooperation with China's Telecom Authorities, and supported/ sponsored by major telecom industries in the world. Most of the global pioneers and leaders in 3G wireless/ 4G mobile systems and networks, including IMT/ UMTS/ MWIF/ WAP/ SDR, will give feature talks at WI 01. Third Generation Wireless and Beyond (including 3G wireless and 4G mobile) have gained an increased interest during the last few years. This has been fuelled by a large demand on high frequency utilization as well as a large number of users requiring simultaneous multidimensional high data rate access for the applications of wireless mobile internet and e-commerce. The 3G/ 4G will use a new network architecture (e. g. All-IP NET) to deliver broadband services and emerging interactive multimedia communications. Large bandwidth, guaranteed quality of service and ease of deployment coupled with recent great advancements in semiconductor technologies for wireless applications make 3G/ 4G a very attractive solution for broadband service delivery.

To reflect the technical and professional excellence of this WI 01, selected papers from the Conference proceedings will be converted to IEEE or ACM Journals/ Magazines as Special Issues on Wireless Internet Technologies and Applications. Other contributions will be recommended to ITU-R, ETSI, IEEE, etc as inputs of the technical white papers.

The conference will be just ahead of IEEE WCNC 01 and PCIA 01 so that Conference attendees can join these events continuously.

For detailed information, please look at the web site at:
<http://3gwireless.com/wi2001>

Thank you and welcome on board.

Dr. Willie W. LU, General Chair, Siemens/ Infineon, E-mail:
wwlu@ieee.org

Feature Editor of Wireless Communications

IEEE Communications Magazine

IEEE Journal of Selected Areas in Communications

Beijing (Peking), China

Co-Sponsored by MII MST