

# GTEM 室与开阔场的辐射测量之间关系研究<sup>1</sup>

薛谦忠 任列辉 陈志雨

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要** 该文详细推导了用电、磁偶极矩展开表示的电小尺寸辐射体在 GTEM 室的辐射功率与开阔场中辐射场之间的理论关系,修正了 Lee 理论中相应公式,并将理论结果与标准单极子辐射源实验结果进行了比较.结果表明两者符合的很好.这说明 GTEM 室和开阔场辐射测量具有密切的相关性.对于电小尺寸的辐射体, GTEM 室不仅可以用于 EMS 测试,也可用于做 EMI 测试.

**关键词** GTEM 室, 开阔场, 辐射测量

**中图分类号** O441

## 1 引言

研究 GTEM 室 (Giga-hertz Transverse ElectroMagnetic cell) 与开阔场的辐射测量之间的关系具有重要意义.人们可以利用它们之间的相关性,用 GTEM 室代替开阔场或暗室、半暗室做辐射的 EMI (ElectroMagnetic Interference) 预测试.这将给没有暗室、半暗室的单位提供一个做辐射 EMI 预测的廉价手段.因此, GTEM 室与开阔场的辐射测量之间的关系的研究引起了国内外学者的关注. P. Wilson<sup>[1,2]</sup> 在不考虑电偶极矩和磁偶极矩相位的条件下研究了 GTEM 室与开阔场的辐射测量之间的关系. Lee<sup>[3]</sup> 在此基础上引入了电偶极矩和磁偶极矩相位,直接由辐射体在 GTEM 室的输出功率推算了它在开阔场或半暗室的辐射场.然而,我们把 Lee 的理论我们的实验结果进行了对比,发现垂直极化方向的辐射场与实验基本吻合,而水平极化相差较大<sup>[4]</sup>.在本文中,我们考虑到了电偶极矩和磁偶极矩相位及它们各分量之间的相互作用,修正了 Lee 的理论,并把修正后的理论与实验结果进行了比较,结果表明:理论与实验结果基本吻合.本文的第 2 节给出 GTEM 室与开阔场的辐射场之间的理论关系;第 3 节给出了实验结果,并与理论结果进行了比较.

## 2 GTEM 室与开阔场的辐射测量之间关系

任何有限尺寸的辐射体都可以用等效的多极矩展开来表示辐射体外的辐射场.若辐射体是电小尺寸的,则辐射体产生的远区辐射场可由一组电偶极矩和磁偶极矩表示<sup>[2,5]</sup>:

$$\mathbf{E} \approx -i\omega\mu_0[e^{-jk_0r}/(4\pi r)][\mathbf{P} - jk_0\mathbf{a}_r \times \mathbf{M}] \quad (1)$$

其中  $\mathbf{P} = P_x e^{j\phi_{px}} \mathbf{a}_x + P_y e^{j\phi_{py}} \mathbf{a}_y + P_z e^{j\phi_{pz}} \mathbf{a}_z$  为电偶极矩,  $\mathbf{M} = M_x e^{j\phi_{mx}} \mathbf{a}_x + M_y e^{j\phi_{my}} \mathbf{a}_y + M_z e^{j\phi_{mz}} \mathbf{a}_z$  为磁偶极矩,  $\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y, \mathbf{a}_z$  和  $\mathbf{a}_r$  分别是  $x, y, z$  和  $r$  方向上的单位矢量.开阔场的测量如图 1 所示.水平极化电场可表示为

$$\begin{aligned} |E_h| &= |E_\phi| = |-E_x \sin \varphi + E_y \cos \varphi| \\ &= \left( \frac{\eta_0 k_0}{4\pi} \right) \left| \left\{ \frac{e^{-jk_0 R_1}}{R_1} [\mathbf{P}_R - jk_0 \mathbf{a}_{R_1} \times \mathbf{M}_R] + \frac{e^{-jk_0 R_2}}{R_2} [\mathbf{P}_I - jk_0 \mathbf{a}_{R_2} \times \mathbf{M}_I] \right\}_x \sin \varphi \right. \\ &\quad \left. - \left\{ \frac{e^{-jk_0 R_1}}{R_1} [\mathbf{P}_R - jk_0 \mathbf{a}_{R_1} \times \mathbf{M}_R] + \frac{e^{-jk_0 R_2}}{R_2} [\mathbf{P}_I - jk_0 \mathbf{a}_{R_2} \times \mathbf{M}_I] \right\}_y \cos \varphi \right| \\ &= \left( \frac{\eta_0 k_0}{4\pi} \right) \left| \frac{e^{-jk_0 R_1}}{R_1} W_1 + \frac{e^{-jk_0 R_2}}{R_2} W_2 \right| = \left( \frac{\eta_0 k_0}{4\pi} \right) \sqrt{K_{hR_1} + K_{hR_2} + K_{h\cos}} \quad (2) \end{aligned}$$

<sup>1</sup> 2001-12-26 收到, 2002-04-12 改回

国家自然科学基金项目 (No.60171002) 资助课题

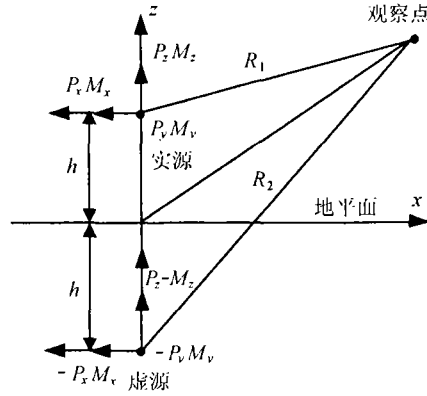


图 1 辐射体在开阔场中辐射测量的示意图

其中  $P_R, P_I, M_R, M_I$  是电磁偶矩的实部和虚部。

$$W_1 = \left( \frac{y P_x e^{j\phi_{px}}}{R_1} - \frac{x P_y e^{j\phi_{py}}}{R_1} \right) - j k_0 \left( \frac{z_1 y M_y e^{j\phi_{my}} - (x^2 + y^2) M_z e^{j\phi_{mz}} + z_1 x M_x e^{j\phi_{mx}}}{R_1^2} \right) \quad (3)$$

$$W_2 = \left( -\frac{y P_x e^{j\phi_{px}}}{R_2} + \frac{x P_y e^{j\phi_{py}}}{R_2} \right) - j k_0 \left( \frac{z_2 y M_y e^{j\phi_{my}} + (x^2 + y^2) M_z e^{j\phi_{mz}} + z_2 x M_x e^{j\phi_{mx}}}{R_2^2} \right) \quad (4)$$

$$K_{hR_1} = |W_1|^2 / R_1^2, \quad K_{hR_2} = |W_2|^2 / R_2^2 \quad (5)$$

$$K_{h \cos} = \frac{2 \cos[k_0(R_1 - R_2)] \operatorname{Re}(W_1 W_2^*) + 2 \sin[k_0(R_1 - R_2)] \operatorname{Im}(W_1 W_2^*)}{R_1 R_2} \quad (6)$$

$R_1$  和  $R_2$  分别是接收天线到辐射源及其地面镜像的距离,  $x, y, z$  为观察点的坐标,  $h$  为实源距开阔场平板的高度,  $z_1 = z - h, z_2 = z + h$  (见图 1)。由 (3) 式, (4) 式可推出

$$\begin{aligned} |W_1|^2 = & (P_x^2 + k_0^2 M_x^2) \left( \frac{y}{R_1} \right)^2 + (P_y^2 + k_0^2 M_y^2) \left( \frac{x}{R_1} \right)^2 - \frac{2xy P_x P_y \cos(\phi_{px} - \phi_{py})}{R_1^2} \\ & + k_0^2 \left\{ [y^2 M_y^2 + x^2 M_x^2 + 2xy M_x M_y \cos(\phi_{mx} - \phi_{my})] (z_1 / R_1^2)^2 \right. \\ & \left. - 2z_1 M_z \frac{y M_y \cos(\phi_{my} - \phi_{mz}) - x M_x \cos(\phi_{mx} - \phi_{mz})}{R_1^2} \right\} \\ & + 2k_0 \left\{ \left( \frac{z_1}{R_1} \right) \left[ \left( \frac{y^2}{R_1^2} \right) P_x M_y \sin(\phi_{px} - \phi_{my}) - \left( \frac{x^2}{R_1^2} \right) P_y M_x \sin(\phi_{py} - \phi_{mx}) \right] \right. \\ & \left. + \frac{x}{R_1} P_x M_z \sin(\phi_{px} - \phi_{mz}) - \frac{y}{R_1} P_y M_z \sin(\phi_{py} - \phi_{mz}) \right\} \\ & + \frac{z_1 xy}{R_1^3} [P_x M_x \sin(\phi_{px} - \phi_{mx}) + P_y M_y \sin(\phi_{py} - \phi_{my})] \end{aligned} \quad (7)$$

同理, 可以求出  $|W_2|^2$ , 只须将上式中的  $R_2$  换成  $R_1$ . 也不难得到

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(W_1 W_2^*) = & k_0^2 \left\{ \frac{1}{R_1 R_2} [M_z M_y (y z_1 - y z_2) \cos(\phi_{mz} - \phi_{my}) \right. \\ & \left. + M_z M_x (x z_1 - x z_2) \cos(\phi_{mz} - \phi_{mx})] - M_z^2 \right\} \\ & + k_0 \left\{ \frac{1}{R_1^2 R_2^2} (R_1 z_2 - R_2 z_1) [y^2 P_x M_y \sin(\phi_{px} - \phi_{my}) - x^2 P_y M_x \sin(\phi_{py} - \phi_{mx}) \right. \\ & \left. + xy P_x M_x \sin(\phi_{px} - \phi_{mx}) - xy P_y M_y \sin(\phi_{py} - \phi_{my})] \right. \\ & \left. + \frac{1}{R_1 R_2} (R_1 + R_2) M_z [y P_x \sin(\phi_{px} - \phi_{mz}) - x P_y \sin(\phi_{py} - \phi_{mz})] \right\} \\ & - \frac{1}{R_1 R_2} \{ x^2 P_y^2 + y^2 P_x^2 - 2xy P_x P_y \cos(\phi_{px} - \phi_{py}) \} \end{aligned} \quad (8)$$

在 (6) 式中, 当测量条件满足  $2zh/(x^2 + y^2)^{1/2} \ll \lambda$  或  $\operatorname{Im}(W_1 W_2^*) \ll \operatorname{Re}(W_1 W_2^*)$  时,  $2 \sin k_0 (R_1 - R_2) \operatorname{Im}(W_2 W_2^*)$  项的大小与  $2 \cos[k_0 (R_1 - R_2)] \operatorname{Re}(W_1 W_2^*)$  相比就可忽略, 在此不必计算. 把修正后的结果 (7) 式, (8) 式与 Lee 的结果 [3] 相比较可以看出: 不论是电、磁偶极矩各分量对辐射场的贡献或者是电、磁偶极矩各分量之间的耦合对辐射场的贡献都有一定的差异, 在 (7) 式, (8) 式中, 将  $(x, y)$ ,  $(P_x, P_y)$  和  $(M_x, M_y)$  分别用  $(y, -x)$ ,  $(P_y, -P_x)$  和  $(M_y, -M_x)$  代替仍保持不变, 具有空间结构上的对偶性, 然而在 Lee 的理论中不具有这一特性.

理论计算开阔场时需要知道辐射体的等效电偶极矩和磁偶极矩. 它们可通过对辐射体在 GTEM 室输出功率测量来获得. 为此, 建立坐标系  $(x, y, z)$  和坐标系  $(x', y', z')$  分别固定在 GTEM 室和辐射体上, 如图 2 所示. 用  $e_{0y}(o)$  表示辐射体在 GTEM 室坐标系辐射体位置上电场基模的  $y$  分量. GTEM 室的输出功率为 [2]

$$|a_0|^2 = \frac{1}{4} |P_y e^{j\phi_{py}} - jk_0 M_x e^{j\phi_{px}}|^2 e_{0y}^2(o) \quad (9)$$

根据 (9) 式, 电、磁偶极矩幅值及其相应的相位可以在 GTEM 室中将辐射体通过三种摆法沿垂直轴分别旋转  $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ, 270^\circ$ , 测量输出功率来获得. 具体测量方法参看文献 [2, 3].

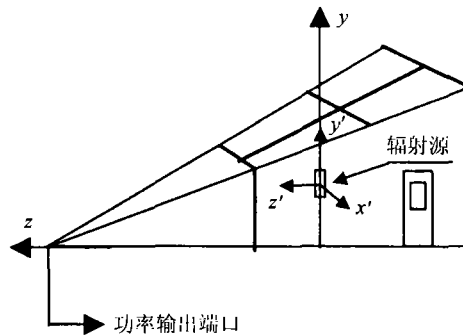


图 2 辐射体在 GTEM 室辐射测量的示意图

### 3 开阔场中辐射体的辐射测量

为了验证 GTEM 室与开阔场的辐射场之间的理论关系,对梳状源带动的电单极子在开阔场中辐射场进行了测量。单极长度为 17cm;梳状源的频率为: 10MHz~100MHz,每 10MHz 一根谱线; 100MHz~1000MHz,每 100MHz 一根谱线。用辐射体在 GTEM 室的测量结果反推出开阔场中辐射场的理论结果与实际测量的实验结果的对比见表 1。从表 1 可以看出,改进后的算法在 15 组频点中,其中有 9 个频点优越于 Lee 的算法,较接近与实验测量值。5 组频点与实验测量值相差 5dB 之内说明 GTEM 室和开阔场辐射测量具有相关性。当辐射场为垂直极化时, GTEM 室和开阔场辐射测量也同样具有相关性<sup>[4]</sup>。在 15 组频点中,少数频点劣于 Lee 的算法,这也说明单口宽带 GTEM 室传输模式理论和建立偶极子模型的应用范围还有待于进一步研究。图 3 为 1250MHz 单频锁相源带动的电单极子在接收高度为 1~4m 范围内理论结果与实验结果。由图 3 可见,改进后算法的计算结果与实验测量值符合的很好,明显优越于 Wilson 和 Lee 的结果。 $h$  在 1~2.7m 范围内改进后的理论结果与实验结果基本重合;随高度的增加误差变大,是由于当  $h$  变大时,条件  $2zh/(x^2 + y^2)^{1/2} \ll \lambda$  或  $\text{Im}(W_1 W_2^*) \ll \text{Re}(W_1 W_2^*)$  不能很好满足的缘故,但它们之间的变化趋势完全一致。这说明 GTEM 室和开阔场辐射测量具有密切的相关性。

表 1 GTEM 室与开阔场结果对照

f(MHz)	水平发射		
	测量值 (dBV/m)	Lee 结果	本文方法结果
20	-33.0	-49.6	-40.7377
30	-64.8	-58.8	-52.1589
40	-54.1	-63.4	-68.3480
50	-44.9	-49.8	-49.3471
60	-44.4	-58.7	-45.5783
70	-56.5	-62.8	-48.0516
80	-49.8	-56.3	-42.9226
103	-31.6	-40.1	-26.7750
200	-31.9	-50.9	-42.9568
300	-19.6	-24.6	-14.9302
400	-17.4	-32.9	-11.9832
500	-35.3	-32.0	-14.6008
600	-24.6	-44.4	-33.7723
700	-26.3	-33.6	-23.7903
800	-40.6	-47.9	-41.5609

垂直发射高度: 0.99m 垂直接收高度: 1.535m 水平间距: 3m

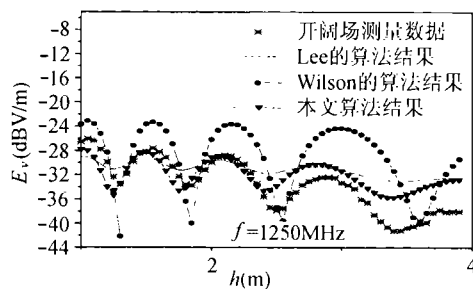


图 3 单频锁相源带动的电单极子在垂直接收高度 1~4m 范围理论结果与实验结果

#### 4 结束语

本文详细推导了电小尺寸辐射体在 GTEM 室的辐射功率与开阔场中辐射场之间的理论关系,并用两种标准的电单极子进行了实验测量,进一步检验了 GTEM 室和开阔场辐射测量之间的相关性.其理论结果与实验结果比较说明:GTEM 室和开阔场辐射测量具有密切的相关性,对于简单电小尺寸的辐射体用 GTEM 室不仅可以用于 EMS(ElectroMagnetic Susceptibility) 测试,而且做辐射 EMI 测试也是可行的.另一方面,对于单口宽带 GTEM 室传输模式理论和简单电小尺寸的辐射体的偶极子模型应用范围还有待于进一步研究.

#### 参 考 文 献

- [1] P. Wilson, On the correlating TEM cell and OATS emission measurements, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 1985, EMC-27(3), 137-142.
- [2] P. Wilson, On the correlating TEM cell and OATS emission measurements, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 1995, EMC-37(1), 1-16.
- [3] Ae-Kyoung Lee, An algorithm for an advanced GTEM to ground plane correlation of radiated emission test, IEEE EMC Symposium, Seattle, 1996, 58-62.
- [4] 任列辉, 陈志雨, GTEM 室与开阔场的辐射发射相关研究, 电波科学学报, 2002, 17(1), 74-77.
- [5] Julius Adams Stratton, Electromagnetic Theory, New York and London, McGRAW-HILL book company, 1941, 176-179, 235-237.

### CORRELATION BETWEEN GTEM CELL AND OPEN AREA TEST SITE IN EMISSION MEASUREMENTS

Xue Qianzhong    Ren Liehui    Chen Zhiyu

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**Abstract** This paper derives in detail the horizontal radiated electric fields from an electrically small radiator which may be well represented by the electric dipole and the magnetic moments, then the Lee's corresponding formula are modified. Theoretical results compared with experimental data measured directly over OATS agree well. This shows that GTEM cell measurements are correlative with OATS emission measurements. For the electrically small radiator, GTEM cell may be used not only for EMS test but also for EMI test.

**Key words** GTEM cell, Open area test sites, Radiated emission measurements

薛谦忠: 男, 1962 年生, 博士后, 主要研究方向为电磁散射、高功率微波器件理论研究及应用、高功率微波大气传输理论和电磁兼容研究等.

任列辉: 男, 1975 年生, 助理研究员, 主要研究方向为电磁理论研究及应用.

陈志雨: 男, 1945 年生, 研究员, 长期从事电磁场理论、电波传播、天线理论研究和电磁兼容研究.