

# 瞬态电磁脉冲能量传输特性的实证研究

吴明和, 崔海娟, 孙云卿, 曾 刚

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**以馈电脉冲为高斯脉冲为例,对瞬态电磁脉冲能量传输特性进行了简洁的理论解释和实验验证。首先以圆形电流辐射单元为例讨论其能量传输的三段式规律及验证,对圆形电流在远场处的辐射能量进行分析,辐射源可以看作点辐射源;其次以点辐射单元为前提研究并验证阵列辐射单元的三段式传输规律。瞬态电磁脉冲能量传输特性由多列瞬态电磁波的叠加造成,不是麦克斯韦方程存在光子解的结果。

**关键词** 阵列辐射单元; 三段式传输规律; 瞬态电磁脉冲; 圆形电流

中图分类号 TN011.3

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.03.015

## Analysis and Verification of Energy Transmission Characteristic for Transient Electromagnetic Pulses

WU Ming-he, CUI Hai-Juan, SUN Yun-qing, and ZENG Gang

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** The energy transmission characteristic of transient electromagnetic pulses is analysed and verified when Gaussian pulses are fed to antennas. The uniformly distributed circular current is simplified as a point radiation source according to the analysis and verification of energy transmission characteristic when far field of antenna is studied. On basis of this simplification for radiation source, the analysis and verification of energy transmission characteristic with arrayed elements have been completed. Transmission energy along  $z$  axis comes from superposition of transient electromagnetic waves rather than photon quantum characteristic of Maxwell equations for radiation sources.

**Key words** arrayed radiation elements; three distinct stages of energy transmission; transient electromagnetic pulses; uniformly distributed circular current

自二十世纪80年代人们提出超宽带电磁学概念以来,关于瞬态电磁脉冲传输特性特别是阵列瞬态电磁脉冲的传输规律一直是该领域的热点课题之一。文献[1-3]提出了瞬态电磁脉冲传输规律的电磁导弹理论(electromagnetic missile, EMM)。该理论认为瞬态电磁脉冲具有慢衰减传输的内禀特性,为电磁波时域资源开发奠定了十分广阔的应用前景。但是,自瞬态电磁脉冲概念提出以来就不断受到质疑,其主要原因包括两方面:1) 瞬态电磁脉冲具有慢衰减特性的物理实质一直得不到合理的解释。有学者提出了瞬态电磁脉冲遵循新的电磁理论的波动方程,希望能够得到光子解,以此来解释瞬态电磁脉冲的慢衰减特性<sup>[4]</sup>。但电磁导弹理论建立在经典麦克斯韦理论的基础上,原则上不可能得到光子解。2) 瞬态电磁脉冲慢衰减特性缺乏直接的实验证据。由于当时高功率瞬态电磁脉冲源研制和其他技术手

段的限制,长距离或阵列瞬态电磁脉冲传输特性一直没有得到可靠的实验验证。文献[5]用镜像法给出了电磁导弹的初步实验结果,文献[6]在水下用声波做了电磁脉冲串的模拟实验,文献[7]用瞬态电磁脉冲源完成了近距离电磁导弹的初步实验。

随着近年来高功率瞬态电磁脉冲源研制以及光电技术的发展<sup>[8-10]</sup>,瞬态电磁脉冲传输特性的实验研究成为可能。本文选择光导开关产生的高斯脉冲为馈电脉冲讨论圆形电流单元的辐射特性;以此为基础讨论阵列瞬态电磁脉冲的传输规律,提出瞬态电磁脉冲传输特性是多列电磁波叠加结果,不是麦克斯韦方程的光子解。

## 1 理论分析与解释

### 1.1 圆形电流单元的辐射特性

将偶极子天线放在抛物面天线的焦平面上,将

抛物面天线上的电流分布看成均匀分布在半径为 $a$ 的圆形上的电流分布,如图1所示。根据麦克斯韦方程得到圆形电流在轴线中心的辐射能量密度<sup>[11-13]</sup>为:

$$G = \frac{\eta}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ g_1 g_2 f^2 \left( t - \frac{R_1}{c} \right) + f^2 \left( t - \frac{z}{c} \right) \right] dt - \frac{\eta}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} (g_1 + g_2) f \left( t - \frac{R_1}{c} \right) f \left( t - \frac{z}{c} \right) dt \quad (1)$$

式中,  $g_1(z) = \frac{z}{R_1}$ ;  $g_2(z) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{z^2}{R_1^2} \right)$ ;  $\eta = \frac{1}{\epsilon c}$ ;  $R_1 = \sqrt{a^2 + z^2}$ ;  $g_2(z) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{z^2}{R_1^2} \right)$ ;  $z$ 表示轴线上的研究点到圆形电流中心的距离;  $c$ 、 $\epsilon$ 分别为真空中的光速和介电常数;  $f(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{T} \right)^2 \right]$ ;  $f(t)$ 为高斯时域波形;  $t_0 = 5T$ 为馈入高斯脉冲最大值所对应的时刻。设 $G_0$ 为不衰减段的轴线能量值,数值计算得到轴线能量特性如图2所示。

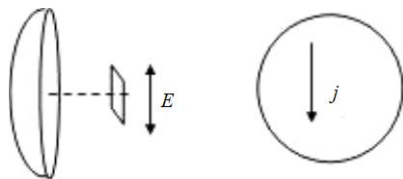


图1 圆形电流元的实现

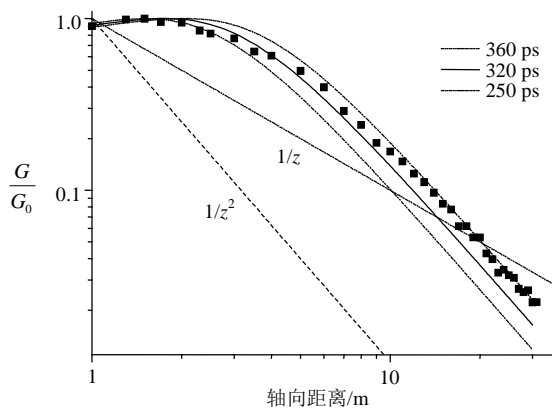


图2 慢衰减实验测试结果与理论计算的比较

轴线能量随距离衰减具有不衰减段、慢衰减段和快衰减(二次方反比衰减)三段“三段式”规律。

当式(1)中  $\frac{R_1}{c} - \frac{z}{c} \geq T$  时, 即有:

$$z \leq \frac{a^2 - c^2 T^2}{2cT} \quad (2)$$

圆形电流边沿辐射的电磁波和圆心处辐射的电磁波不能叠加, 轴线距离 $z$ 的范围为不衰减段。

当式(1)中  $\frac{T}{2} < \frac{R_1}{c} - \frac{z}{c} < T$  时, 即有:

$$\frac{a^2 - c^2 T^2}{2cT} < z < \frac{4a^2 - c^2 T^2}{cT} \quad (3)$$

圆心处及其附近的电流辐射电磁波和圆形电流边沿辐射的电磁波部分叠加, 形成慢衰减段。

当式(1)中  $\frac{R_1}{c} - \frac{z}{c} \leq T/2$  时, 即有:

$$z \geq \frac{4a^2 - c^2 T^2}{cT} \quad (4)$$

圆形电流边沿辐射的电磁波和圆心处辐射的电磁波叠加, 轴线能量随着轴线距离 $z$ 按照二次方反比衰减, 可以将圆形电流看成点源电流。文献[14-15]表明, 对于方形单元辐射器, 当轴线距离足够远时, 方形单元辐射器的电流可看成点源电流。

当 $a=1.5$  m时, 从下到上脉冲宽度依次为360、320、250 ps, 理论计算轴线能量随着轴线距离 $z$ 变化的规律用图2中的上面3条连续曲线表示; 图2中的间断方点代表实验测试结果。测试用脉冲宽度 $T$ 为320 ps的高斯脉冲, 可看出理论计算和实验吻合很好。

下面对阵列瞬态电磁脉冲的传输规律讨论时将每个辐射器单元都看作点源模型。

## 1.2 阵列瞬态电磁脉冲的传输规律

### 1.2.1 点源近似模型

设单元天线辐射电磁脉冲通过其轴线 $z_0$ 点的时域波形为:

$$E_s(z_0) = E_0 f \left( t - \frac{z_0}{c} \right) \quad (5)$$

式中,  $z_0$ 通常取单元天线不衰减距离的最大值;  $E_0$ 为 $z_0$ 点对应的电场。按点源近似模型, 单元天线辐射电磁脉冲通过待测点的时域波形为:

$$E_s(r_{ij}) = z_0 E_0 / r_{ij} f(t - r_{ij}/c) \quad (6)$$

式中,  $f(t - r_{ij}/c)$ 为高斯脉冲传到待求点的脉冲, 有:

$$f \left( t - \frac{r_{ij}}{c} \right) = \exp \left[ - \left( t - t_0 - \frac{r_{ij}}{c} \right)^2 / T^2 \right] \quad (7)$$

式中,  $T$ 为高斯脉冲源的脉冲宽度。

第 $i$ 行、 $j$ 列的单元天线到待测点的距离为 $r_{ij}$ 。按照电场叠加原理, 天线阵列辐射电磁脉冲通过待测点的时域波形为:

$$E(r_{ij}) = \sum_{i,j} \frac{z_0 E_0}{r_{ij}} f \left( t - \frac{r_{ij}}{c} \right) \quad (8)$$

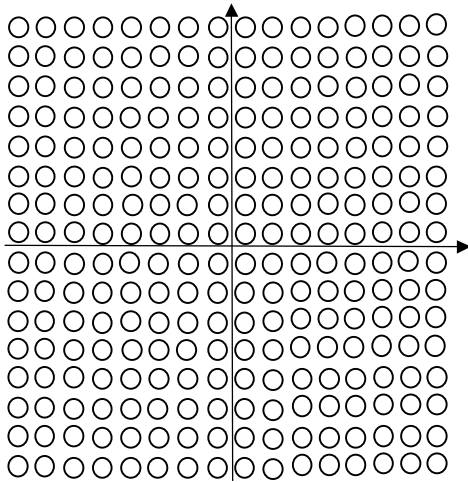
利用点源辐射近似模型下天线阵列能量的传输规律为:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{\int_{r_{\min}/c-T}^{r_{\max}/c+T} E^2(r_{ij}) dt}{\sum_{i,j} \int_{z_0/c-T}^{z_0/c+T} E_s^2(z_0) dt} \quad (9)$$

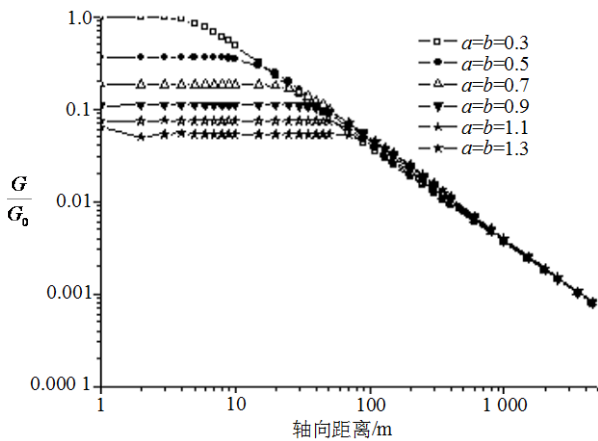
式中,  $r_{\min}$ 为辐射单元距待求点的最小距离;  $r_{\max}$ 为辐射单元距待求点的最大距离。该式可用于均匀布阵时, 计算轴线能量随着轴线上距离 $z$ 的变化规律。

1.2.2 数值计算

本文以式(9)为基础, 计算了16×16阵列天线的轴线能量传输特性, 如图3a所示。其中,  $a=b=0.3$ 、0.5、0.7、0.9、1.1、1.3 m分别表示阵元天线的行、列间距。



a. 16×16阵列槽天线均匀布阵示意图



b. 16×16阵列天线能量传输特性计算

图3 16×16阵列天线

从图3b可以看出, 1) 尽管阵元间距不同, 但阵列轴线的能量都具有三段式规律: 不衰减段(能量不随距离衰减的距离段, 即图3b中与 $z$ 轴平行段)、慢衰减段(能量随距离的衰减满足 $G/G_0 \propto 1/z^\delta$ ,  $0 < \delta < 2$ 的距离段)和快衰减段(能量随距离的衰减满足 $G/G_0 \propto 1/z^2$ 的距离段); 2) 各距离段的距离为:

$$\begin{cases} z \leq \frac{l^2 - T^2 c^2}{2Tc} & \text{不衰减距离段} \\ \frac{l^2 - T^2 c^2}{2Tc} \leq z \leq \frac{4l^2 - T^2 c^2}{Tc} & \text{慢衰减距离段} \\ z \geq \frac{4l^2 - T^2 c^2}{Tc} & \text{快衰减距离} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $z$ 为轴线待求点距辐射阵面的距离;  $l$ 为阵列半口径宽度。

1.2.3 阵列瞬态电磁脉冲传输特性的物理解释

轴线上距离 $z$ 处天线阵元间的最大波程差引起的时间差为:

$$\Delta\tau = \frac{\sqrt{z^2 + l^2} - z}{c} \quad (11)$$

按瑞利判据, 要使各阵元辐射电磁脉冲不在空间形成相长叠加的前提为:

$$\Delta\tau = \frac{\sqrt{z^2 + l^2} - z}{c} \geq T \quad (12)$$

由式(12)可得不衰减距离段应为:

$$z \leq \frac{l^2 - T^2 c^2}{2Tc} \quad (13)$$

上述表明, 不衰减段形成的物理实质是指阵元天线各自辐射的电磁脉冲未能在轴线上距离 $z$ 点实现场分量的同步相长叠加, 从而各自独立通过待求 $z$ 点造成的; 而当各天线阵元辐射电磁脉冲各自无互耦通过待求 $z$ 点时, 测到通过 $z$ 点的总能量为常数, 表现为能量随距离的不衰减。

当 $\Delta\tau$ 满足以下公式:

$$T/2 \leq \Delta\tau = \frac{\sqrt{z^2 + l^2} - z}{c} \leq T \quad (14)$$

两瞬态电磁脉冲处于可分辨与不可分辨之间, 随着 $\Delta\tau$ 的减小, 一方面各脉冲场分量的同步相长合成效率增高; 另一方面随着 $z$ 的增加,  $\Delta\tau$ 可减小, 由式(6)可知, 瞬态电磁脉冲幅值将随 $z$ 衰减。因此, 合成的瞬态电磁脉冲随距离衰减的速率取决于上述使幅值增加与衰减的速率, 实际造成阵列瞬态电磁脉冲的慢衰减特性。对式(14)化简可得:

$$\frac{l^2 - T^2 c^2}{2Tc} \leq z \leq \frac{4l^2 - T^2 c^2}{Tc} \quad (15)$$

式(15)所得结果与采用严格电磁场理论计算的结果一致, 表明慢衰减特性的物理实质是阵列瞬态电磁脉冲合成效率提高与电磁脉冲随距离衰减两方面因素相互竞争的结果。

当 $\Delta\tau$ 满足以下公式:

$$\Delta\tau = \frac{\sqrt{z^2 + l^2} - z}{c} \leq T/2 \quad (16)$$

由式(16)可得:

$$z \geq \frac{4l^2 - T^2c^2}{Tc} \quad (17)$$

从物理图像看,式(17)表示阵元瞬态电磁脉冲已基本实现了场分量的同步相长合成,即电磁脉冲的合成效率增加已达极限,随着 $z$ 的增加,合成后的阵列瞬态电磁脉冲只能随距离成反比例衰减,体现为能量的平方反比衰减,这就是快衰减的物理实质。

### 1.3 阵列“三段式传输规律”实验验证

本文测试阵列辐射系统天线阵面倾角,如图4a所示(用铅垂线测试与调节)。阵面中心水平高度,测试跑道各点的水平高度 $h$ ,可以测量阵面轴线上不同距离点的场强。用槽天线作为接收天线,接收到的信号如图4b所示。由于轴线能流密度 $G$ 正比于电场强度 $E^2$ ,可以得到轴线各点的相对能流密度( $G/G_0$ ), $G_0$ 为参考点的能流密度(通常选 $z=1$  m处的 $G$ 作标准)



a. 辐射阵列天线系统

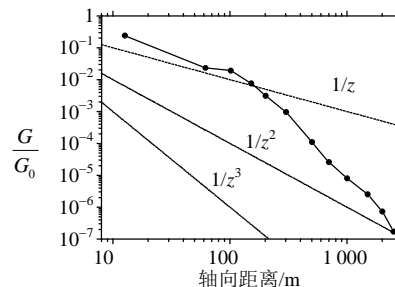


b. 接收天线波形

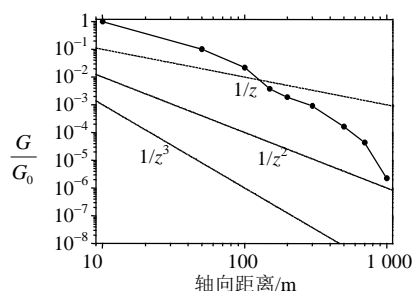
图4 脉冲辐射系统和接收波形

图5给出了不同子阵数目情况下的轴线能流密度实验测试曲线,子阵列的数目分别为4、8、16。测试结果表明:1) 不论选用中心的4个子阵,还是左边的8个子阵或者全部的16个子阵,阵列瞬态电磁脉冲的轴线能量都呈现出“三段式”传输规律;2) 在

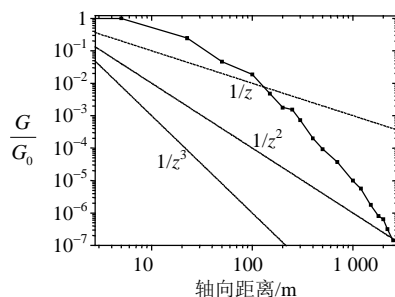
实验误差范围内,不衰减、慢衰减和快衰减各段的传输距离范围与式(13)、(15)、(17)式的理论计算结果相符合;3) 在远场区,轴线能量都出现了立方衰减现象,可能与环境反射、测试误差和空气尘埃散射等因素有关。



a. 4个子阵的轴线能量衰减



b. 8个子阵的轴线能量衰减



c. 16个子阵的轴线能量衰减

图5 4、8、16个子阵轴线能量

## 2 结论

本文以高斯馈电脉冲为例,讨论了圆形电流单元对电磁脉冲能量传输的三段式特性;将辐射单元看作点源,探讨了阵列瞬态电磁脉冲传输特性的数值计算,对其特性进行了物理解释,设计实验验证了瞬态电磁脉冲传输特性;根据点源模型得到的数值计算结果和实验测量结果是一致的。无论单元辐射源还是阵列辐射源,电磁脉冲能量传输都具有三段式特性。瞬态电磁脉冲能量传输规律是多列电磁波在研究点叠加的结果,不是麦克斯韦方程的光子解。

### 参考文献

- [1] SHEN H M, WU T T. The transverse energy pattern of an electromagnetic missile from a circular disk[J]. Proc SPIE,

- 1989, 1061: 321-324.
- [2] MYERS J M, WU T T. Electromagnetic missiles from currents on fractal sets[J]. Proc SPIE, 1990, 1226: 314-323.
- [3] SHEN H M, WU T T. The property of the Electromagnetic missile[J]. J Appl Phys, 1989, 66(8): 4025-4034.
- [4] 阮成礼. 电磁导弹概论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1994.
- RUAN Cheng-li. An introduction to electromagnetic missiles[M]. Beijing: People Post & Telecommunications Publishing House, 1994.
- [5] SHEN H M. Experimental study of electromagnetic missiles[J]. Proc SPIE, 1988, 873: 346-399.
- [6] ZIOLLKOWSKI R W, LEWIS D K, COOK B D. An experimental research for the localized wave packet[J]. J Acoust Soc Am, 1988, 84(Suppl 1): 209.
- [7] 阮成礼, 万长华, 袁乃昌. 电磁导弹的初步实验[J]. 电子科技大学学报, 1992, 21(1): 92-97.
- RUAN Cheng-li, WAN Chang-hua, YUAN Nai-chang. Preliminary experiment of electromagnetic missiles[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1992, 21(1): 92-97.
- [8] NUNNALLY W C. High-power microwave generation using optically activated semiconductor switches[J]. IEEE, Trans, Electron Devices, 1990; 37: 2439-2448.
- [9] LOUBREIL G M, ZUTAVERM F J, O'MALLEY M W, et al. High gain GaAs photoconductive semiconductor switches for impulse sources[J]. SPIE, 1994, 2343:180-186.
- [10] SCHOENBERG J S H, BURGER J W, SCOOTTYO J, et al. Ultra-wideband source using gallium arsenide photoconductive semiconductor switches[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(2): 327-334.
- [11] YANG H C, RUAN C L. Beam scanning and decaying property of linear element planar antenna array[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5): 496-501.
- [12] 杨瑜, 杨宏春, 孙云卿. 超宽带电脉冲的慢衰减特性[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(5): 924-926.
- YANG Yu, YANG Hong-chun, SUN Yun-qing. Slowly decreasing property of ultra-wide band pulse[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(5): 924-926.
- [13] 杨宏春, 阮成礼, 崔海娟, 等. 线元天线阵列超短电脉冲传输特性实验研究[J]. 电波科学学报, 2007, 22(1): 17-20.
- YANG Hong-chun, RUAN Cheng-li, CUI Hai-yuan, et al. Transmission property of ultra-short electric pulse radiated by linear element antenna array[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(1): 17-20.
- [14] 王珊, 曾刚, 阮成礼. 平面阵列天线轴线能量的慢衰减特性[J]. 微波学报, 2006, 22(6): 45-47.
- WANG Shan, ZENG Gang, RUAN Cheng-li. Axial energy density's attenuation of planar antenna array[J]. Journal of Microwaves, 2006, 22(6): 45-47.
- [15] 杨宏春, 阮成礼, 杨春, 等. 脉冲波形对其轴线上能量传输特性影响的研究[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1430-1435.
- YANG Hong-chun, RUAN Cheng-li, YANG Chun, et al. The study of axial energy decaying property influenced by pulse waveform[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(10): 1430-1435.

编辑 黄 莘