

高功率微波土壤击穿的数值验证研究

唐涛

Numerical validation study of high power microwave soil breakdown

Tang Tao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 045203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.045203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国联合球形托卡马克氦放电等离子体的碰撞辐射模型及其在谱线比法诊断的应用

[A collisional-radiative model for the helium plasma in the sino-United spherical tokamak and its application to the line intensity ratio diagnostic](#)

物理学报.2014, 63(12): 125203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125203>

高功率全光纤结构主振荡功率放大器中模式不稳定现象的实验研究

[Experimental study on mode instability in high power all-fiber master oscillator power amplifier fiber lasers](#)

物理学报.2014, 63(8): 085202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.085202>

基于高斯型脉冲的非线性 Ramsey 干涉

[Nonlinear Ramsey interference with Gaussian pulse](#)

物理学报.2013, 62(22): 225202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.225202>

一类扰动发展方程近似解

[Approximate solution for a class of the disturbed evolution equation](#)

物理学报.2012, 61(15): 155202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.155202>

同轴波导虚阴极振荡器二极管参数优化的研究

[Theoretical and numerical study on optimization of diode parameters in virtual cathode oscillator](#)

物理学报.2011, 60(10): 105202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.105202>

高功率微波土壤击穿的数值验证研究*

唐涛†

(成都信息工程学院电子工程学院, 成都 610225)

(2014年4月23日收到; 2014年8月26日收到修改稿)

高功率微波在土壤中传播时, 会引起土壤击穿电离而导致土壤电阻率的非线性变化, 土壤电阻率的变化又将反作用于传播过程, 加剧高功率微波衰减, 影响其能量传输效率. 通过对土壤动态电离过程的分析, 结合 Maxwell 方程组构建了高功率微波土壤传播模型, 采用时域有限差分法对该模型进行数值验证. 数值结果显示了高功率微波在土壤中传播、衰减等物理图像, 以及土壤电阻率的非线性变化过程. 理论分析验证了这些数值结果.

关键词: 高功率微波, 传播模型, 土壤电离, 数值验证

PACS: 52.35.Mw, 52.25.Os, 41.20.Jb, 02.70.Bf

DOI: 10.7498/aps.64.045203

1 引言

由于高功率微波 (high power microwave, HPM) 源技术取得的进展^[1-3]及其所具有的特性, 使得它在定向能技术、高灵敏度超远距离雷达、等离子体加热、射频电子直线加速器、探测、电子对抗、功率聚束传输等工业与国防方面具有广阔的应用前景. 这些应用使得 HPM 脉冲的大气传输、击穿及其与等离子体的相互作用等都备受研究者的关注^[4-7]. 实际上, 由于 HPM 携带的强电场, 使得其传播于任何介质都将会引起一系列非线性现象^[8], 不同介质对 HPM 的传播也有影响^[9], 由此带来的传播路径上的电磁特性将会发生剧变, 导致许多复杂的物理过程, 这些过程又将反过来影响 HPM 的传播效率.

在电子对抗、埋地爆炸物的清除以及地下掩体对 HPM 能量的防护等实际问题中, 将会涉及 HPM 在土壤中的传播特性. 刘琨等^[10]对 HPM 能量传输特性及电波环境效应进行了研究, Ala 等^[11,12]研究了在雷电脉冲作用下的土壤电离过

程. 本文将 Maxwell 方程组和土壤电离过程相结合来描述土壤在 HPM 作用下的物理模型, 并对其数值验证.

2 土壤电离模型

HPM 在介质中的传播必须满足 Maxwell 方程组, 土壤作为有耗媒质, Maxwell 方程可以写为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2)$$

其中, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{H} 为磁场强度, \mathbf{B} 为磁感应强度, \mathbf{D} 为电位移矢量, 电流密度 $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$, $\sigma = 1/\rho$ 为土壤电导率, ρ 为土壤电阻率.

土壤的击穿阈值 E_c 约为 1 MV/m ^[13], 由于 HPM 携带强电场, 入射到土壤时会引起传播路径上的土壤局部击穿而引发击穿电离. 电离结果导致土壤电阻率下降, 该过程会反作用于脉冲的传播, 使脉冲能量衰减.

土壤击穿电离的具体过程可以分为以下三个阶段: 1) HPM 入射到土壤, 场强大于土壤击穿阈

* 国家自然科学基金 (批准号: 61201095)、四川省教育厅科研基金 (批准号: 13ZB0076) 和成都信息工程学院科研基金 (批准号: J201202, CRF201309) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tangt@cuit.edu.cn

值, 土壤开始电离, 电阻率下降, HPM 能量相应衰减; 2) 电离减缓, 土壤电阻率下降到一个最小值, HPM 能量已大幅衰减; 3) 在 HPM 剧烈衰减和 HPM 已经传过的区域, 土壤电阻率缓慢恢复到初始值水平. 其中 1), 2) 和 3) 阶段土壤电阻率的变化过程可以分别由以下公式描述^[11]:

$$\rho = \rho_0 e^{(-t/\tau_1)}, \quad (3)$$

$$\rho = \rho_i + (\rho_0 - \rho_i) \left(1 - e^{-t/\tau_2}\right) \left(1 - E/E_c\right)^2, \quad (4)$$

其中, ρ_0 为初始稳态值, ρ_i 为土壤电阻率的最小值, τ_1 为电离时间常数, τ_2 为电阻率恢复时间常数.

将 (3) 和 (4) 式对时间 t 求偏导, 可以得到

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -1/\tau_1 \rho \quad (E > E_c), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} = & \frac{1}{\tau_2} (\rho_0 - \rho_i) e^{-t/\tau_2} \left(1 - \frac{E}{E_c}\right)^2 \\ & - \frac{2}{E_c} (\rho_0 - \rho_i) (1 - e^{-t/\tau_2}) \\ & \times \left(1 - \frac{E}{E_c}\right) \frac{\partial E}{\partial t}. \end{aligned} \quad (6)$$

由于土壤电阻率为有限值, 再考虑到 E_c 的取值范围等因素, (6) 式右边第二项可以忽略, 最终写为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{\tau_2} [\rho_i - \rho + (\rho_0 - \rho_i)(1 - E/E_c)^2]. \quad (7)$$

通过以上分析, HPM 在土壤中传播的实际物理过程就可以由 (1), (2), (5) 和 (7) 式联合构建的数学模型来描述.

3 HPM 土壤传播模型的数值验证

根据由偏微分方程 (1), (2), (5) 和 (7) 构建的 HPM 土壤传播模型的特点, 可以采用时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 方法对其进行数值求解.

将电场分量 E 置于整数时间格点, 磁场分量 H 和土壤电阻率 ρ 置于半整数时间格点. 并且将电场分量 E 和土壤电阻率 ρ 置于整数空间格点位置, 磁场分量 H 置于半整数空间格点位置. 以 (2) 式为例, 其 FDTD 中心差分格式可以写为

$$\begin{aligned} & E_r^{n+1}(i) \\ = & \frac{\bar{\rho}^{n+1/2}(i)\varepsilon_r - \Delta t}{\bar{\rho}^{n+1/2}(i)\varepsilon_r + \Delta t} E_r^n(i) \\ & - \frac{\bar{\rho}^{n+1/2}(i)\Delta t}{(\bar{\rho}^{n+1/2}(i)\varepsilon_r + \Delta t)\Delta r} \end{aligned}$$

$$\times \left[H_r^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}\right) - H_r^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2}\right) \right], \quad (8)$$

其中,

$$\bar{\rho}^{n+1/2}(i) = \frac{\rho^{n+1/2}(i) + \rho^{n+1/2}(i-1)}{2}$$

表示在空间上的平均, 上标 n 表示时间格点, i 表示空间格点; Δt 为时间步长, 其大小受 Courant 稳定性条件限制; Δr 为空间步长, 其值由数值色散条件限制^[14]; $\varepsilon_r = 3\varepsilon_0$, $\mu_r = \mu_0$ 分别为土壤的相对介电常数和磁导率.

边界条件只需要考虑位于空间整数格点上的分量, 即 E 和 ρ . 对于电场分量 E , 可以直接使用一阶 Mur 边界条件^[14]. 电阻率 ρ 的边界处理方式由下式给出^[6]:

$$\begin{aligned} f^{n+1}(i) = & \frac{2(f^n(i \pm 1) - f^n(i \pm 2))}{\Delta z^2} \\ & (i = 0 \text{ 或 } N), \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $i = 0$ 或 N 分别表示空间起始、终止点边界.

4 数值验证

以正弦型 HPM 垂直入射到干燥、均匀土壤中的传播过程为例. 设脉冲频率为 1 GHz, 脉冲宽度为 30 ns, 场强为 2 MV/m, 土壤初始电阻率 $\rho_0 = 50 \Omega \cdot \text{m}$ ^[11], 时间常数 $\tau_1 = 20 \text{ ns}$, $\tau_2 = 45 \text{ ns}$. HPM 在土壤中传播的物理过程如图 1 所示 (便于比较, 将土壤中不同位置的 HPM 时域波形横坐标设置相同).

由于土壤击穿, 电阻率降低, HPM 在土壤中迅速衰减, 传播 1 m 后, 场强最大值下降为源的 1/10, 传播 2 m 后, 场强最大值仅为 HPM 源的 1/117. 实际上, 对于 1 GHz 的电磁波, 该土壤属于弱导电媒质, 如果土壤未发生击穿, 电磁波在其中传播, 根据 $\alpha = \sigma/(2\sqrt{\mu/\varepsilon})$, 其衰减常数约为 2.18. 那么传播 2 m 后, 场强应为入射源的 1/77, 即 HPM 的实际衰减要大于普通电磁波在土壤中传播相同距离的衰减, 这也可以证明土壤在 HPM 作用下确已发生了电离.

通过图 1 还可以发现, 该 HPM 脉冲的尾部衰减要大于脉冲前沿, 这是因为土壤电离导致电阻率下降需要时间, 而在该时间之内, HPM 的前沿已经传过了. 这和 HPM 大气传播的“尾蚀”现象^[15]类似.

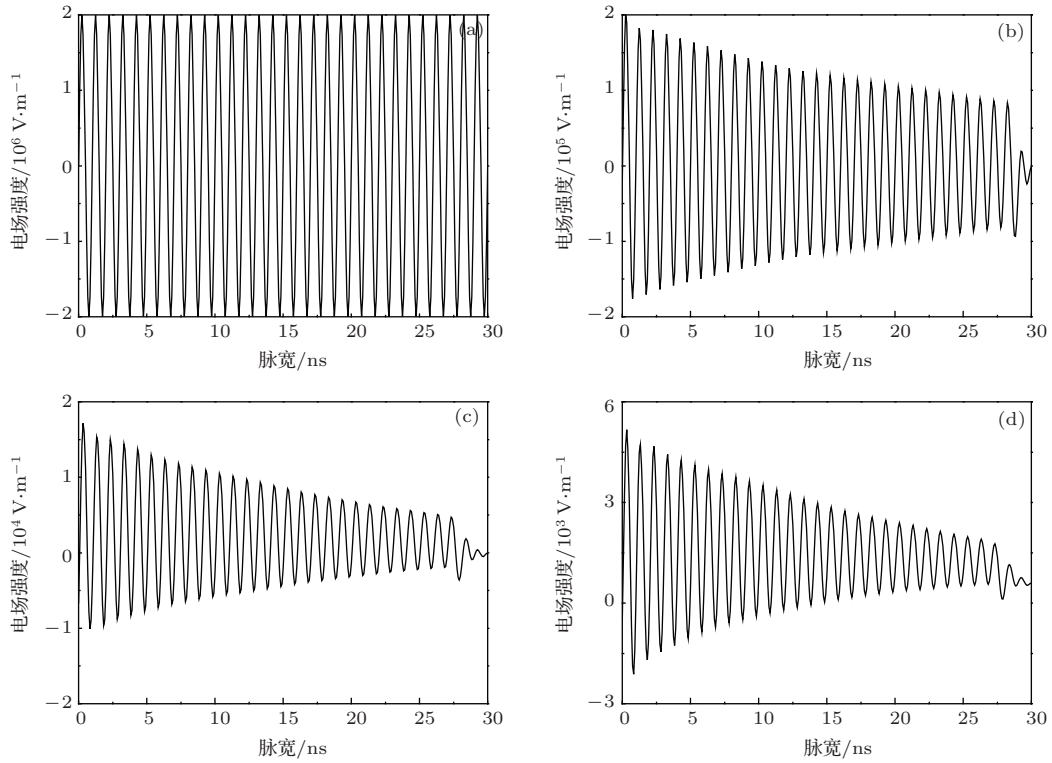


图1 HPM在土壤中传播的时域波形 (a) HPM源; (b) 土壤下1 m; (c) 土壤下2 m; (d) 土壤下2.5 m

当HPM完全衰减之后, 对那些HPM已经传过的区域, 土壤电阻率将会缓慢恢复到其初始值. 图2给出了土壤电阻率随时间的变化. 当然, 土壤电阻率的变化和时间常数 τ_1 , τ_2 的取值有关. 关于 τ_1 , τ_2 的具体取值将会在进一步研究中通过实验确定.

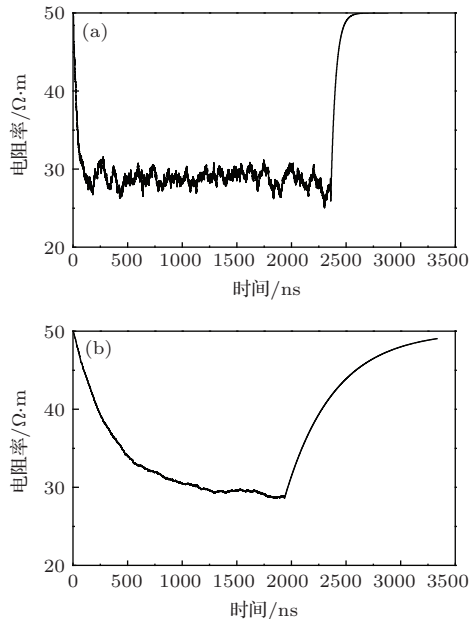


图2 时间常数取值不同时土壤电阻率随时间的变化 (a) $\tau_1 = 20$ ns, $\tau_2 = 45$ ns; (b) $\tau_1 = 200$ ns, $\tau_2 = 450$ ns

5 结 论

本文将HPM在土壤中传播所引起的土壤击穿电离过程与Maxwell方程组结合构建HPM土壤传播模型. 利用FDTD方法对该模型进行了数值验证, 获取了HPM在土壤中传播的物理图像. 将HPM与普通电磁波在土壤中传播衰减进行比较, 可以得出结论: 土壤在HPM作用下发生击穿电离, 导致土壤电阻率减小, 同时也加剧了HPM的衰减. 土壤电阻率的变化曲线印证了HPM土壤传播三个阶段的假设.

参考文献

- [1] Chen Z G, Wang J G, Wang Y, Qiao H L, Guo W J, Zhang D H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 168402 (in Chinese) [陈再高, 王建国, 王玥, 乔海亮, 郭伟杰, 张殿辉 2013 物理学报 **62** 168402]
- [2] Bragg J W, Sullivan III W W, Mauch D, Neuber A A, Dickens J C 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 054703
- [3] Song W, Zhang Z Q, Li J W, Zhang Q Y, Cai L B 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 013504
- [4] Song W, Shao H, Zhang Z Q, Huang H J, Li J W, Wang K Y, Jing H, Liu Y J, Cui X H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 064101 (in Chinese) [宋玮, 邵浩, 张治强, 黄惠军, 李佳伟, 王康懿, 景洪, 刘英君, 崔新红 2014 物理学报 **63** 064101]

- [5] Liu G Z, Liu J Y, Huang W H, Zhou J S, Song X X, Ning H 2000 *Chin. Phys.* **9** 757
- [6] Tang T, Liao C, Yang D 2010 *Chin. J. Radio Sci.* **25** 122 (in Chinese) [唐涛, 廖成, 杨丹 2010 电波科学学报 **25** 122]
- [7] Tang T, Liao C, Lin W B 2010 *Progress Electromag. Res. M* **14** 207
- [8] Hao X W, Song B P, Zhang G J, Qiu S, Huang W H, Qin F, Jin X 2012 *High Power Laser Particle Beams* **24** 16 (in Chinese) [郝西伟, 宋伯鹏, 张冠军, 秋实, 黄文华, 秦风, 金晓 2012 强激光与粒子束 **24** 16]
- [9] Dong Y, Dong Z W, Zhou Q H, Yang W Y, Zhou H J 2013 *High Power Laser Particle Beams* **25** 1215 (in Chinese) [董焱, 董志伟, 周前红, 杨温渊, 周海京 2013 强激光与粒子束 **25** 1215]
- [10] Liu K, Xu B, Lin L K, Lu C S, Wang H G 2013 *Space Electron. Technol.* **10** 6 (in Chinese) [刘琨, 徐彬, 林乐科, 卢昌胜, 王红光 2013 空间电子技术 **10** 6]
- [11] Ala G, Buccheri P L, Romano P, Viola F 2008 *IET Sci. Meas. Technol.* **2** 134
- [12] Ala G, Silvestre Di M L, Viola F, Francomano E 2009 *Prog. Electromag. Res. B* **14** 1
- [13] Asimakopoulou F E, Gonos I F, Stathopoulos I A 2011 *IET Sci. Meas. Technol.* **5** 14
- [14] Ge D B, Yan Y B 2002 *Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves* (Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press) pp26–38 (in Chinese) [葛德彪, 闫玉波 2002 电磁波时域有限差分方法 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第26—38页]
- [15] Tang T 2011 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Southwest Jiaotong University) (in Chinese) [唐涛 2011 博士学位论文 (成都: 西南交通大学)]

Numerical validation study of high power microwave soil breakdown*

Tang Tao[†]

(Electronic Engineering College, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

(Received 23 April 2014; revised manuscript received 26 August 2014)

Abstract

The nonlinear changes of soil resistivity will be caused when the high power microwave (HPM) propagates in soil, and these changes in turn counteract the propagation process so that the energy transmission efficiency of the HPM is reduced. By analyzing the dynamic ionization process of soil, a HPM soil propagation model is constructed by combining the Maxwell equations. The model is numerically validated by using a finite difference time domain method. The numerical results show the physical processes of the HPM propagation and attenuation in soil and the nonlinear change process of soil resistivity. These numerical results are verified by a theoretical analysis.

Keywords: high power microwave, propagation model, soil ionization, numerical validation

PACS: 52.35.Mw, 52.25.Os, 41.20.Jb, 02.70.Bf

DOI: 10.7498/aps.64.045203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61201095), the Scientific Research Foundation of the Education Department of Sichuan Province, China (Grant No. 13ZB0076), and the Scientific Research Foundation of Chengdu University of Information Technology, China (Grant Nos. J201202, CRF201309).

† Corresponding author. E-mail: tangt@cuit.edu.cn