

李祥超<sup>1</sup> 李鹏飞<sup>1</sup> 周中山<sup>1</sup> 曹洪亮<sup>1</sup> 陈则煌<sup>1</sup>

# 基于天线接收原理雷电流监测方法的研究

## 摘要

针对天线耦合雷电电磁波信号频谱及能量不准确的问题,利用实验和理论相结合的方法,建立天线接收雷电电磁波信号的等效电路,分析雷电电磁波信号的频谱和能量分布规律,提出一种用宽带天线监测雷电流的方法,通过测量雷电辐射源的电磁脉冲在宽带天线上耦合的电压幅值和能量幅值推算雷电流值的大小及其变化趋势.结果表明:宽带天线能准确地监测雷电电磁脉冲和雷电流值以及它们的变化趋势.实验结果和理论分析结论基本吻合.研究结果对雷电监测预警系统的改进和雷电参数及其活动规律的研究具有指导意义.

## 关键词

宽带天线;雷电电磁波;耦合;S11曲线;能量

中图分类号 TM862

文献标志码 A

收稿日期 2015-07-31

作者简介

李祥超,男,副教授,高级实验师,硕士生导师,主要研究方向为天线设计与雷电过电压保护器的研究开发.lxfanglei@163.com

<sup>1</sup> 南京信息工程大学 中国气象局气溶胶与降水水重点开放实验室,南京,210044

## 0 引言

雷电是自然界频繁发生的一种高强度电磁脉冲现象,因其影响面积大,受到气象、电力、铁路、石油、航空等诸多部门的广泛关注<sup>[1]</sup>.雷电流及其雷电电磁脉冲是雷电参数的主要内容,是掌握雷电活动规律和性质的重要前提.雷电电磁脉冲作为一种雷电放电短暂瞬变的电磁现象,从其时域波形看,一般具有陡峭的前沿、很高的峰值场强,脉冲宽度较窄;从频域看,则覆盖了较宽的频带.它可能对电子、电力、光电、微波等设施造成破坏,甚至使其设备失效或永久的损坏<sup>[2-3]</sup>.

近年来,对雷电流、雷电电磁脉冲以及宽带天线的研究引起越来越多学者的重视<sup>[4-13]</sup>.王巨丰等<sup>[4]</sup>改进了雷电参数计算模型和磁带法测量装置,提出将磁带封装在PVC塑料管中的方法,提高了测量装置的抗干扰度.杨静等<sup>[5]</sup>研制了一种磁场测量天线系统,对雷电流及其近距离电磁环境进行了测量,取得较好的测量结果.赵斌等<sup>[6]</sup>设计了一种远程雷电流监测系统,使用Rogowski电流探头测量雷电流信号.王婧<sup>[7]</sup>利用光学电流传感器的原理,设计了一套可用于实时测量雷电直击电流的装置.但是这些已见文献中没有研究宽带天线对雷电电磁脉冲耦合的情况.本文利用4种天线同时耦合同源雷电电磁波进行对比分析,提出一种用宽带天线监测雷电流的方法.通过自制宽带天线,测量雷电辐射源的电磁脉冲在接收天线上耦合电压幅值来推算雷电流值的大小.实验结果表明,该方法能更准确地测量雷电电磁脉冲的大小及其变化趋势,为今后雷电监测系统的改进以及雷电参数及其活动规律的研究提供相关参考.

## 1 雷电波的理论分析

### 1.1 闪电通道辐射电磁波的理论

设雷电流为 $i(t)$ ,源点 $P$ 的电流元 $idz'$ 到场点 $Q$ (图1)的距离为

$$r_{PQ} = \sqrt{(z - z')^2 + r^2}.$$

设向量磁位为

$$A_z = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dz'}{\sqrt{(z - z')^2 + r^2}} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \ln \left( \frac{-z + l/2 + \sqrt{(z - l/2)^2 + r^2}}{-(z + l/2) + \sqrt{(z + l/2)^2 + r^2}} \right),$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ,为真空磁导率.则场中的磁感应强度为

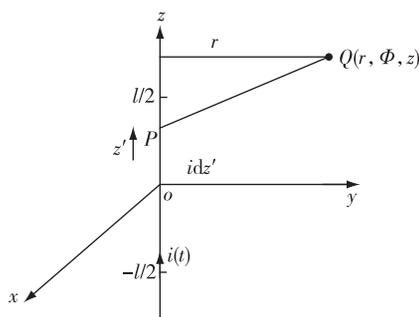


图1 雷电放电通道有限长线电流产生的磁场模型  
Fig.1 Magnetic model by finite length current of lightning discharge channel

$$\vec{B} = \nabla \times A_z = \left( \frac{1}{r} - \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} \right) i_r + \left( \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) i_\varphi + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial \varphi} (r A_\varphi) - \frac{\partial A_r}{\partial \varphi} \right) i_z = - \frac{\partial A_z}{\partial r} i_\varphi = \frac{\mu_0 i}{4\pi r} \cdot \left( \frac{-z + l/2}{\sqrt{(z - l/2)^2 + r^2}} + \frac{z + l/2}{\sqrt{(z + l/2)^2 + r^2}} \right) i_\varphi.$$

当磁带长远远小于雷电通道长(如避雷针、接地引下线、避雷线、输电铁塔以及通信等各种信号、控制电缆)时,雷电通道可视为“无限长”载流直导线,即:

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \vec{B} = - \frac{\partial A_z}{\partial r} i_\varphi = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} i_\varphi,$$

雷电流  $i(t)$  通道周围磁场强度  $H$  为

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{i(t)}{2\pi r}.$$

## 1.2 天线接收理论

天线接收电磁能量的物理过程是:接收天线一般位于发射天线的远区,发射天线在远区辐射横电磁球面波<sup>[14-16]</sup>,在小范围内,可视作均为平面波,因而认为接收天线处于均匀平面波场中(图2).天线在这种外场作用下激励起感应电动势,并在导体表面产生电流,该电流流进天线负载  $Z_1$ (接收机),使接收机回路中产生电流.因此,接收天线等同电压源的作用,可用一等效电压发生器代替.等效发生器由电压源和内阻组成,电压源的电压值等于开路电压  $U$ ,内阻是当电压源短路,对应于无来波场时,由外电路看进去的阻抗.这个阻抗称为接收天线的阻抗,并用  $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$  表示.接收天线的等效电路如图3所示,  $Z_1 = R_1 + jX_1$  是负载阻抗,  $U$  为天线接收电动势.  $E'$  为入射电场在该天线作发射时的极化方向上的分量.当  $Z_1$  和  $Z_{in}$  共轭匹配时,即

$$Z_1 = Z_{in}^*, \quad \begin{cases} R_1 = R_{in}, \\ X_1 = -X_{in}. \end{cases}$$

天线输出端电流为

$$I_{in} = \frac{U}{Z_{in} + Z_1} = \frac{L_e E' F(\theta, \phi)}{Z_{in} + Z_1} = \frac{L_e E' F(\theta, \phi)}{2R_{in}},$$

接收功率为

$$P_{re}(\theta, \phi) = \frac{1}{2} |I|^2 R_1 = \frac{1}{2} \frac{(L_e E')^2}{4R_{in}} F^2(\theta, \phi), R_1 = R_{in}.$$

在共轭匹配的情况下,若接收天线的主要最大方向与来波方向一致( $F(\theta, \phi) = 1$ ),且极化也一致时(即  $E' = E^i$ ),接收机可获得最大接收功率:

$$P_{re \max} = \frac{1}{2} \frac{(L_e E^i)^2}{4R_{in}},$$

所以,接收天线是一个把空间电磁波能量转换为高频电流能量的能量转换装置.

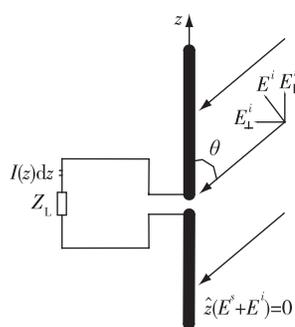


图2 天线接收示意

Fig.2 Schematic view of receiving antenna

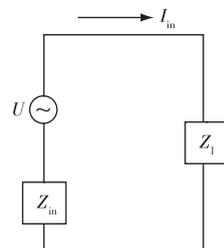


图3 天线等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of the antenna in Fig.2

## 2 实验模型的建立与天线 S11 参数测量

### 2.1 实验模型的建立

实验采用冲击电流发生器(Impulse Current Generator, ICG)模拟雷电流.模型如图4所示,将  $8/20 \mu s$  模拟雷电波施加在高为 1.2 m,直径为 20 mm 的金属棒两端,金属棒在此起到模拟雷电通道并发射雷电电磁波的作用.因为在电磁场理论中认为,各种复

杂的辐射体都可以近似为许多电偶极子和磁偶极子的组合.因此,一般辐射场强可用电偶极子和磁偶极子来进行近似计算,而电偶极子是足够短的载流导线.

在金属棒的两端施加从 5 kA 到 45 kA 的雷电冲击电流,步长为 1 kA.在距金属棒 1 km 的位置,用 4 台 Tektronix TDS 2022B 型示波器采集存储 4 种不同频段的天线(65 MHz~3 GHz、2.4 GHz、1 GHz、400 MHz)同时耦合到的同一冲击电压波形,ICG 的测量系统同时采集存储注入导体棒的雷电流波形.最后将采集到的不同频带天线馈电端的电压波信号分别进行处理,计算出各个频带天线耦合雷电电磁波的电压幅值及能量并统计分析.试验前用 E5071C 型网络分析仪测量不同频段天线的 S11 曲线.

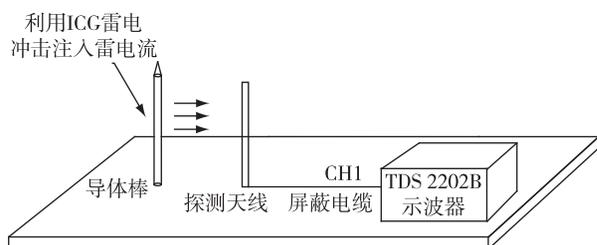


图 4 天线耦合雷电电磁波试验示意

Fig. 4 Schematic view of antenna coupling lightning electromagnetic wave test

## 2.2 各频段天线 S11 参数测量

采用 E5071C 网络分析仪分别对 4 种不同频段天线(图 5)进行测量.参数如下:1)测得天线 1 中心频率为 400 MHz,带宽为 33 MHz(图 6a);2)测得天线 2 中心频率为 1 GHz,带宽为 215 MHz(图 6b);3)测得天线 3 中心频率为 2.4 GHz,带宽为 393 MHz(图 6c);4)测得宽带天线 4 频率带宽为 65 MHz~3 GHz(图 6d).

## 3 天线耦合雷电电磁波特性和分析

### 3.1 天线耦合模拟雷电电磁波的暂态特性分析

实验采用 8/20  $\mu$ s 模拟雷电流.ICG 产生的 8/20  $\mu$ s 模拟雷电流流经 1.2 m 长金属棒,发射雷电电磁波,分别采用宽带天线频率带宽为 65 MHz~3 GHz 以及天线中心频率为 2.4 GHz、1 GHz、400 MHz 4 种天线同时接收.根据波程差可知,此处的接收天线均位于发射天线的远区(夫琅和费区),发射天线在远区辐射横电磁球面波,在局部范围内可视为均匀平面波,因而可以认为接收天线处于同一均匀平面波

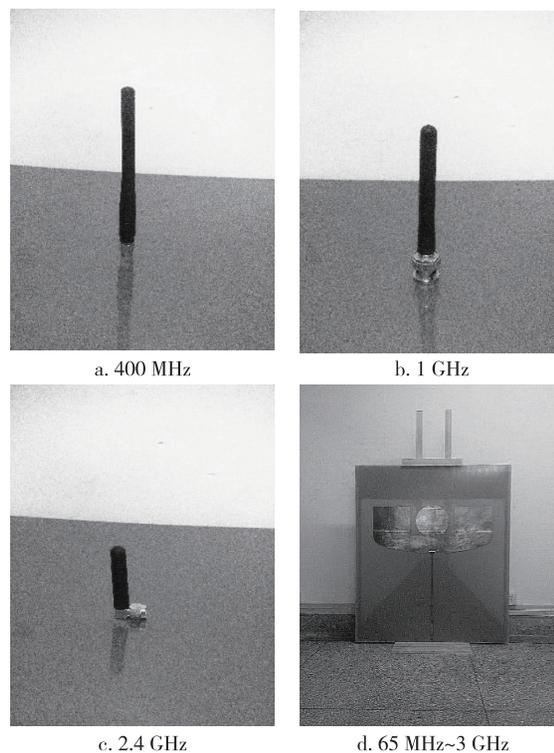


图 5 实验所用天线

Fig. 5 Antennas used in experiment

场中.在雷电冲击电流从 5~45 kA 的测试过程中,选取 20 kA 的雷电冲击电流,在同一坐标轴内查看金属棒发射雷电电磁波在同距离不同天线中的耦合电压,进行纵向观察,来检验各频段天线耦合模拟雷电电磁波的暂态特性.

从图 7 中可见,雷电流能量主要分布在低频部分<sup>[17]</sup>,且雷电电磁波在低频部分增值较快,频率越高,增值越慢,但在高频部分也有相当比重的雷电波的能量.从图 8 中可见,4 种天线在馈电端都有不同大小的耦合电压值.从图 8 天线耦合雷电电磁波暂态来看,65 MHz~3 GHz 天线耦合的雷电电磁脉冲电压值最明显.为准确统计 4 种天线对雷电电磁脉冲的耦合结果,验证宽带天线可以更全面的接收雷电电磁脉冲信号,需要结合数学统计方法进行严谨的分析.

### 3.2 天线耦合雷电电磁波分析

数理统计学上,针对曲线拟合效果的方法以及拟合效果评价的指标较多<sup>[18]</sup>,比如:残差平方和(SSE)、决定系数(R-square)、校正后的决定系数(Adjusted R-square)、均方根误差(RMSE).

考虑到训练样本数量以及检验样本(独立信息量个数)有限.本文使用校正决定系数(记量值为

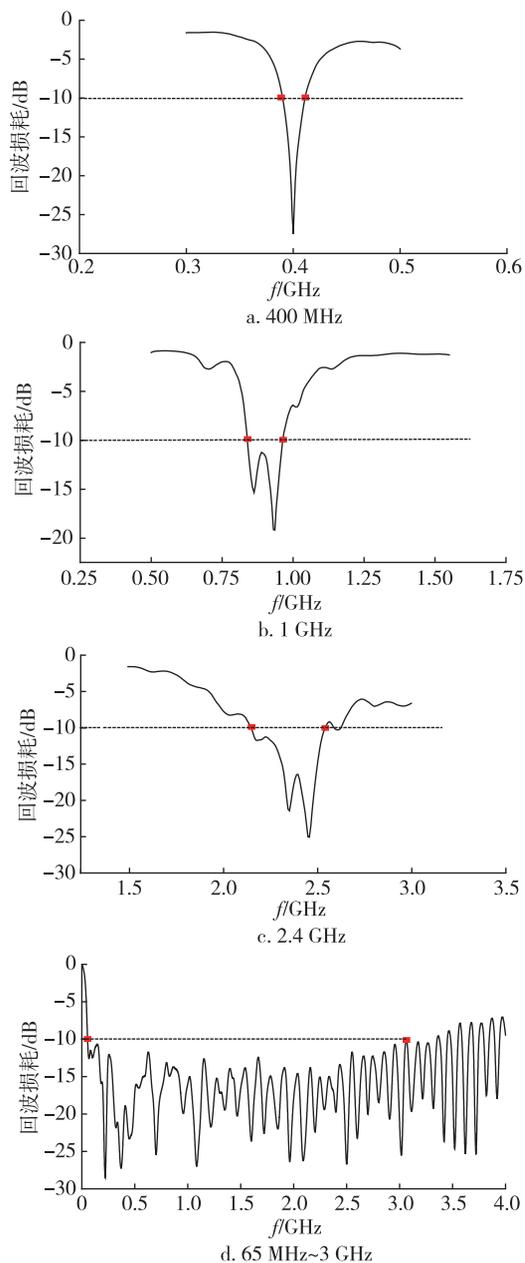


图6 各频段天线S11参数测量

Fig. 6 The S11 curve measurement for different band antennas

$R_A$ )<sup>[19]</sup>和误差累积(Accumulative Error, 记量值为  $A$ )对4种天线耦合电磁场幅值和数据进行对比分析及误差分析.校正决定系数是在定义决定系数的前提下,基于残差自由度对SSE(记量值为  $E_{SS}$ )和SST(误差平方,记量值为  $T_{SS}$ )进行校正,即

$$R_A = 1 - \frac{E_{SS}(n-1)}{T_{SS}(v-1)},$$

$$v = n - m,$$

式中,  $n$  为样本数量,  $m$  为拟合函数中回归系数的个数,  $v$  为独立信息量个数.该指标的取值范围为不大

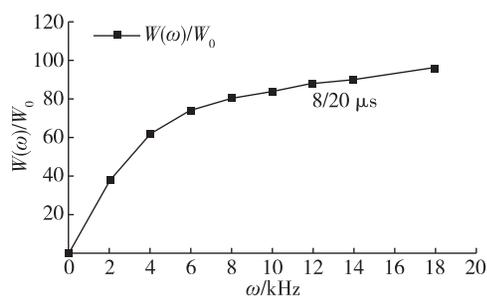


图7 雷电波能量比率累积频率分布

Fig. 7 Accumulated frequency distribution of lightning wave energy ratio

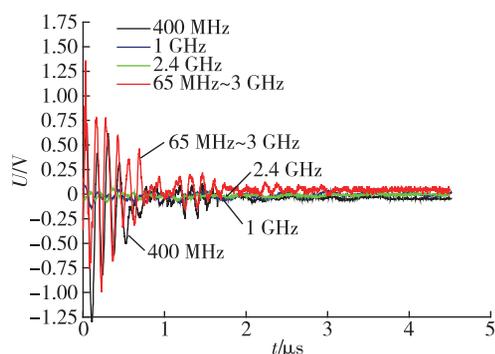


图8 20 kA 冲击电流下天线耦合雷电电磁波暂态

Fig. 8 Transient figure of antenna coupling lightning electromagnetic waves under 20 kA lightning impulse current

于1的任何数,越接近1表示拟合效果越好.

误差累积  $A$  为对各部分计算结果进行积分(或累加)时,其误差也随之累加,最后所得到的误差总和.本文用来表示检验值与曲线计算值的偏差累积的偏差,即:

$$A = \text{sqrt} \left[ \frac{1}{n} \cdot \text{sum} \left( \left( \frac{|\hat{D}(i) - D(i)|}{\hat{D}(i)} \right)^2 \right) \right],$$

其中  $\hat{D}(i)$  为曲线计算值,  $D(i)$  为检验值.该指标中  $\frac{|\hat{D}(i) - D(i)|}{\hat{D}(i)}$  越接近于0表示拟合效果越好.误差偏差  $A$  越小,效果越好,不确定度越低;反之,误差累积  $A$  越大,表示不确定程度有增高的趋势.

### 3.2.1 天线耦合雷电电磁波电压幅值分析

图9为天线在模拟雷电电磁波背景下耦合到的电压幅值分布,模拟雷电流的范围为5 kA到45 kA.从其趋势可见,随着冲击电流的增大,天线耦合模拟雷电电磁波的电压幅值整体呈增大趋势,但并不是呈线性关系.有的雷电流幅值大反而接收到的电压幅值小,主要原因是由于ICG各次试验时输出的雷

电流有陡度变化,引起雷电流的频谱变化,但是不影响整体增大趋势.根据天线接收理论以及天线互易定理,基本振子的感应电动势为  $U = lE^i \sin \theta$ ,当基本振子作发射时电场极化方向与来波极化方向一致,即  $E^i = E'$ .虽然天线的发射与接收过程中,必然伴随着部分能量的损耗,但是对于接收天线耦合到的部分能量,仍遵守天线接收理论与互易定理.因此,此处采用一次线性拟合.

图9中黑色方块的点是在雷电流脉冲电流范围为5 kA到45 kA,步长为1 kA时,天线耦合到的雷电磁脉冲电压幅值;红色三角形是检验数据,用来对已有的拟合曲线进行误差累积检验.从表1可知,65 MHz~3 GHz 宽带天线的校正决定系数是0.857 44,较其他3种天线拟合效果更好.对比图9a、b、c、d中黑色方块形散点的坐标,在同一横坐标值下,纵坐标值大小排序依次为  $d > a > b > c$ ,表明对于同条件下的同一雷电流脉冲电磁场,65 MHz~3 GHz 宽带对雷电磁脉冲的耦合效果较其他3种更为完整和全面.另外,根据实测雷电流的波形频谱分析结果,雷电流的主要能量集中在低频部分,频谱中心为400 MHz天线的比1 GHz天线和2.4 GHz天线对雷电磁脉冲的耦合效果更好.65 MHz~3 GHz 宽带天线的误差累积值为0.014,均比其他3种天线的误差累积值小.可见随着冲击电流值的增加,65 MHz~3 GHz 宽带天线耦合到的雷电流脉冲电磁场电压幅值的波动性较其他天线更弱.这为宽带天线可以稳定地监测雷电流的幅值变化,提供了有利的验证.

表1 天线耦合雷电磁波电压幅值拟合方程、校正决定系数及误差累积

Table 1 Fitting equation, adjusted R-square and error accumulation of antenna coupling lightning electromagnetic wave voltage amplitude

天线	拟合方程	校正决定系数	误差累积
400 MHz	$y = 0.026\ 00x + 60.347\ 0$	0.623 14	0.371 6
1 GHz	$y = 0.005\ 23x + 0.075\ 34$	0.594 72	0.045 9
2.4 GHz	$y = 0.001\ 97x + 0.037\ 62$	0.727 53	0.037 0
65 MHz~3 GHz	$y = 0.034\ 26x + 0.436\ 79$	0.857 44	0.014 0

### 3.2.2 天线耦合雷电磁波耦合能量分析

天线在雷电磁波背景下耦合到的电压波能量

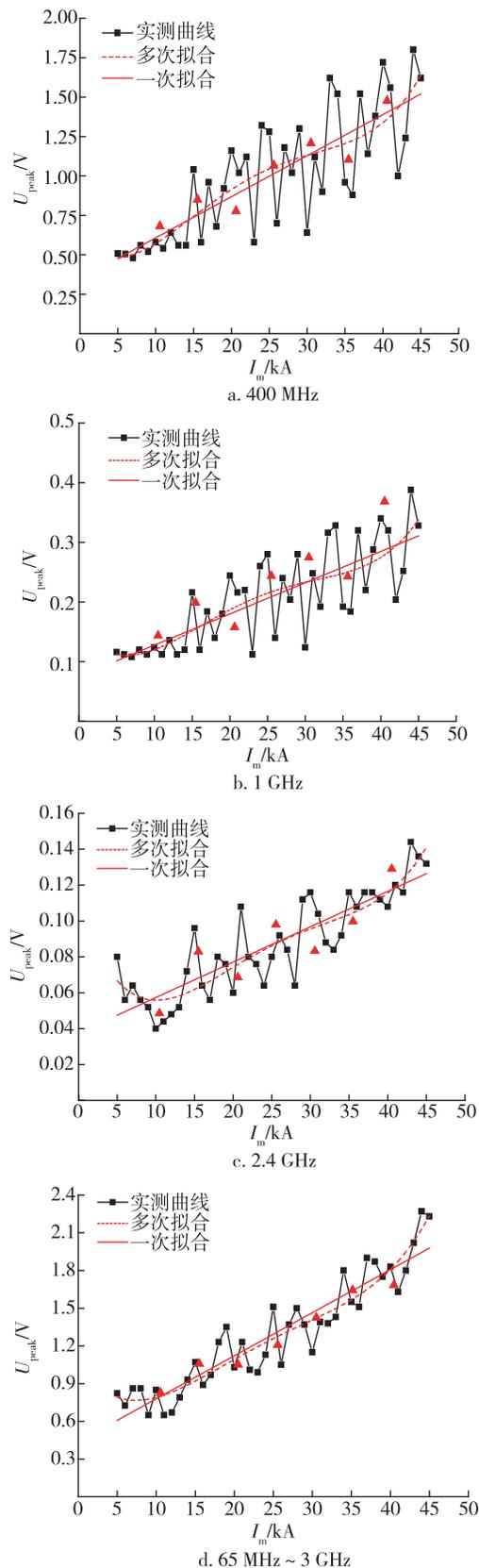


图9 天线耦合雷电磁波幅值  
Fig. 9 Magnitude of antenna coupling lightning electromagnetic waves

整理后如图 10 所示,横坐标表示模拟雷电流,纵坐标表示天线耦合雷电电磁波电压的平方对时间的积分.

从图 10 可见,随着冲击电流的增大,天线耦合的雷电电磁波能量幅值呈锯齿型增大.根据天线互易定理以及费里斯(Friis)传输公式,接收天线的接收功率与电压呈现二次方关系.雷电电磁波能量计算根据的是雷电电磁波接收功率幅值在时间上的积分.因此,此处采用二次线性拟合,并使用检验数据对 4 种天线耦合电磁场能量数据进行对比以及误差累积分析.

从表 2 中发现,2.4 GHz 天线的校正决定系数是 0.999 24,最接近于 1,拟合效果最好.1 GHz 天线与 65 MHz~3 GHz 天线的校正决定系数均是 0.98,比 2.4 GHz 天线的校正决定系数值少 1%,拟合效果很接近.对比图 10a、b、c、d 上的方形散点折线,可以发现 65 MHz~3 GHz 天线的相邻坐标点的波动性较其他 3 种天线仍是更弱.65 MHz~3 GHz 天线耦合雷电电磁波能量的误差累积为 0.012 8,比同情况下的 400 MHz、1 GHz 和 2.4 GHz 天线的误差累积更小,区分度更大.同时,65 MHz~3 GHz 天线耦合雷电电磁波能量的误差累积值较其对电压幅值的误差累积值更小.因此,65 MHz~3 GHz 宽带天线耦合的雷电电磁波能量更能准确地监测雷电流幅值的变化.

表 2 天线耦合雷电电磁波能量拟合方程、校正决定系数及误差累积

Table 2 Fitting equation, adjusted R-square and error accumulation of antenna coupling lightning electromagnetic waves energy amplitude

天线	拟合方程	校正决定系数	误差累积
400 MHz	$y = 4.403 \times 10^{-10}x^2 - 4.208 \times 10^{-9}x + 1.0661 \times 10^{-7}$	0.687 79	0.689 6
1 GHz	$y = 1.725 \times 10^{-11}x^2 - 1.8556 \times 10^{-1}x + 5.0698 \times 10^{-9}$	0.987 30	0.330 1
2.4 GHz	$y = 6.097 \times 10^{-12}x^2 - 6.790 \times 10^{-10}x + 6.7897 \times 10^{-11}$	0.999 24	0.365 3
65 MHz~3 GHz	$y = 9.262 \times 10^{-11}x^2 + 1.019 \times 10^{-10}x + 6.9841 \times 10^{-8}$	0.981 74	0.012 8

### 3.3 天线耦合雷电电磁波设备误差分析

雷电电磁波能量频率的分布较广,本文使用 65 MHz~3 GHz 宽带天线主要是将雷电电磁波的低

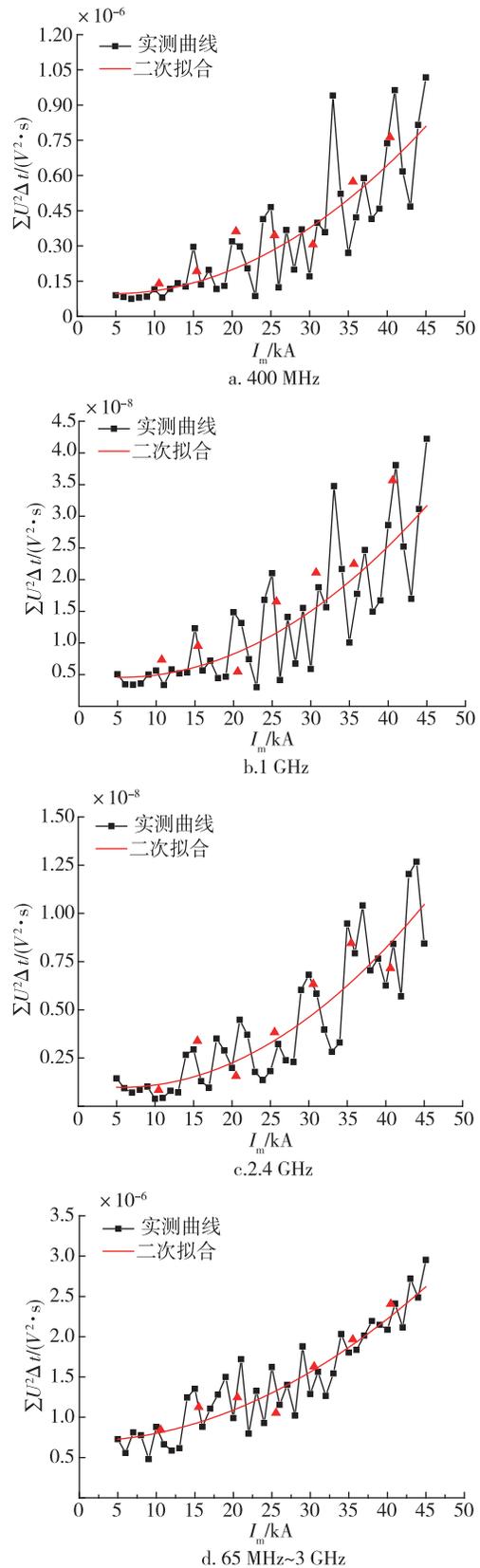


图 10 天线耦合雷电电磁波能量幅值  
Fig. 10 Energy magnitude of antenna coupling lightning electromagnetic waves

频到高频的部分进行接收,尽可能包络雷电电磁波所分布的频段.虽然文中的数据对比以及误差分析数据均是基于归一化计算后的结果,并不会影响所要提出的观点,但是实验中示波器设备的接收等效带宽最高是 2.4 GHz,相应的可能会有 20% 以内的带宽频段示波器无法准确测量.由于客观原因造成的测量误差会在今后设备改进后克服,并进一步完善实验手段.

#### 4 结论

本文提出一种用宽带天线监测雷电流的方法,实验结果表明,该方法能准确地监测雷电电磁脉冲和雷电流的大小以及它们的变化趋势.对今后雷电监测预警系统的改进和雷电活动研究具有指导意义.

1) 通过 20 kA 冲击电流下天线耦合雷电电磁波暂态分析,验证了雷电流能量主要分布在低频部分,且随着频率的升高而递减.

2) 通过实验分析,宽带天线耦合的电压幅值相对其他 3 种天线具有更稳定的增长性,这为宽带天线可以稳定地监测雷电流的幅值变化结论提供了有利的验证.

3) 通过实验分析,宽带天线耦合的能量幅值在相邻坐标点的波动性较其他 3 种天线更弱,耦合雷电电磁波能量的误差累积值较其对电压幅值的误差累积值更小.

#### 参考文献

##### References

[ 1 ] 聂智平,赵文光,张萍,等.利用雷电定位系统进行电网雷击故障快速查询[J].地球空间信息科学学报,2008,11(1):43-48  
NIE Zhiping, ZHAO Wenguang, ZHANG Ping, et al. Power network lightning accident quick inquiry with the lightning location system[J]. Geo-Spatial Information Science, 2008, 11(1): 43-48

[ 2 ] Herndon R L. Electromagnetic pulse (EMP) and tempest protection for facilities [M]. Hyattsville, MD: U S Army Corps of Engineers, Publications Department, 1990

[ 3 ] Schneider B R, Grinter L E. Battlefield of the future: 21st century warfare issues [M]. Maxwell AFB: Air University Press, 1995

[ 4 ] 王巨丰,陆俊杰,彭宇宁,等.雷电参数的测量及其装置研究[J].电网技术,2009,33(18):162-165  
WANG Jufeng, LU Junjie, PENG Yuning, et al. Research on lightning parameter measurement and measuring devices[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 162-165

[ 5 ] 杨静,郗秀书,张广庶,等.磁场测量系统及人工引发雷电放电特征[C]//中国气象学会 2008 年年会大气物理学分会论文集,2008  
YANG Jing, QIE Xiushu, ZHANG Guangshu, et al. Magnetic field measurement systems and artificially triggered lightning discharge characteristics [C] // Atmospheric Physics Session of the Annual Meeting of Chinese Meteorological Society, 2008

[ 6 ] 赵斌,石立华,李炎新,等.远程雷电流监测系统的开发与实验[J].高电压技术,2007,33(11):195-197  
ZHAO Bin, SHI Lihua, LI Yanxin, et al. Development and test of remote measuring system for lightning current[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 195-197

[ 7 ] 王婧.光纤直接雷电测量技术研究[D].武汉:华中科技大学光学与电子信息学院,2008  
WANG Jing. Research of direct lightning measurement with optical fiber [D]. Wuhan: School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science & Technology, 2008

[ 8 ] 刘平,吴广宁,隋彬,等.雷电流波形参数估计仿真研究[J].中国电机工程学报,2009,29(34):115-121  
LIU Ping, WU Guangning, SUI Bin, et al. Simulation research on the lightning current waveform parameter estimations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 115-121

[ 9 ] 王琳,陈亚洲,万浩江,等.雷电斜向放电通道电磁场建模及计算[J].微波学报,2012,28(2):16-21  
WANG Lin, CHEN Yazhou, WAN Haojiang, et al. Modelling and calculation of electromagnetic field of oblique discharge channel [J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(2): 16-21

[ 10 ] 张呈辉,曹祥玉,高军,等.宽频带宽波束磁电偶极子天线设计[J].电子与信息学报,2015,37(3):758-762  
ZHANG Chenghui, CAO Xiangyu, GAO Jun, et al. Broadband and wide beam magneto-electric dipole antenna design [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(3): 758-762

[ 11 ] 刘汉,高卫东,刘伟,等.基于遗传算法的超宽带天线设计[J].微波学报,2013,29(3):27-30  
LIU Han, GAO Weidong, LIU Wei, et al. UWB antenna design based on genetic algorithm [J]. Journal of Microwaves, 2013, 29(3): 27-30

[ 12 ] 徐鸣一,王振会,樊荣,等.江苏省地闪密度及雷电流幅值分布[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2010,2(6):557-561  
XU Mingyi, WANG Zhenhui, FAN Rong, et al. Distribution of lightning density and lightning current amplitude in Jiangsu province [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2010, 2(6): 557-561

[ 13 ] 赵燕君,钱江,武永国,等.基于罗氏线圈的雷电流监测系统的设计与实现[J].仪表技术与传感器,2015(1):68-70  
ZHAO Yanjun, QIAN Jian, WU Yongguo, et al. Design of lightning current monitoring system based on Rogowski coil [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(1): 68-70

[ 14 ] 杨绍华,肖良勇.复杂电磁环境中天线近场数模预

- 测[J].电波科学学报,1995,10(1/2):172-176  
YANG Shaohua, XIAO Liangyong. Mathematical model methods for the calculation of near fields of wire antenna in complicated electromagnetic surroundings[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1995, 10(1/2):172-176
- [15] 王东权,王鹏.短波通信天线场防雷保护技术研究[J].军事通信技术,2010,31(1):47-50  
WANG Dongquan, WANG Peng. Lightning protection of short-wave communication antenna sites[J]. Journal of Military Communications Technology, 2010, 31(1):47-50
- [16] 甄可龙,吕善伟,张岩.强电磁脉冲对雷达接收机的天线耦合分析[J].河北科技大学学报,2011,32(2):147-151  
ZHEN Kelong, LÜ Shanwei, ZHANG Yan. Analysis of antenna coupling of intense electromagnetic pulse to radar receiver[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(2):147-151
- [17] 李祥超,周中山,陈则煌,等.棒形天线耦合雷电电磁波及抑制方法[J].电波科学学报,2015,30(2):357-364  
LI Xiangchao, ZHOU Zhongshan, CHEN Zehuang, et al. On lightning electromagnetic wave coupled by stick antenna and its suppression method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(2):357-364
- [18] Branch M A, Coleman T F, Li Y. A subspace, interior, and conjugate gradient method for large-scale bound-constrained minimization problems[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1999, 21(1):1-23
- [19] 李俊芳,张步涵,谢光龙,等.基于灰色模型的风速-风电功率预测研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):151-159  
LI Junfang, ZHANG Buhan, XIE Guanglong, et al. Grey predictor models for wind speed-wind power prediction[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19):151-159

## Lighting current monitoring based on antenna receiving principles

LI Xiangchao<sup>1</sup> LI Pengfei<sup>1</sup> ZHOU Zhongshan<sup>1</sup> CAO Hongliang<sup>1</sup> CHEN Zehuang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration,  
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** For the inaccurate spectrum and energy measurement of antenna coupled lightning electromagnetic signal, experiment and theory are combined to find an equivalent circuit of antenna receiving lightning electromagnetic wave signals, with the purpose to analyze the spectral energy distribution of lightning and electromagnetic signals, and to propose a method of using broadband antenna to monitor lightning current, as well as estimating the size and trends of the lightning current value by measuring coupled voltage amplitude and energy amplitude of the electromagnetic pulse of lightning radiation sources on the receive antenna. Results show that the antenna with broad band measured by S11 curve can accurately monitor the size of lightning electromagnetic pulse and calculate the value and trends of lightning current. All the experimental results and theoretical analysis conclusions are basically in good agreement, which have guiding significance to the improvement of lightning monitoring, predicting and warning systems and to the measurement and analysis of lightning activity.

**Key words** wideband antenna; lightning electromagnetic wave; coupling; S11 curve; energy