

代甘来,董颖辉.电小甚低频发射天线的地损耗电阻计算与分析[J].电波科学学报,2018,33(4):483-489. DOI: 10.13443/j.cjors.2018011701
DAI G L, DONG Y H. Calculation and analysis of ground loss resistance for an electrically small VLF transmitting antenna [J]. Chinese journal of radio science, 2018, 33(4): 483-489. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2018011701

电小甚低频发射天线的地损耗电阻计算与分析

代甘来 董颖辉

(海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

摘要 针对电小甚低频发射天线辐射电阻小,地损耗影响天线辐射效率的问题,文中研究了基于解析法计算分区域均匀辐射状地网区内磁场损耗电阻、电场损耗电阻和地网区外磁场损耗电阻、电场损耗电阻的方法,根据该方法可实现对分区域均匀辐射状地网的损耗电阻计算。计算结果表明,电小甚低频发射天线的磁场损耗电阻是地损耗的主要部分;此外,在地网总长度和地网敷设区域半径不变的条件下,均匀辐射状地网并不是甚低频天线的地网敷设最佳模式。基于上述结果,提出通过分区域敷设均匀辐射状地网的方法来降低地损耗电阻,为进一步提高电小天线的辐射效率提供了一种新的途径,具有一定的理论和工程实践指导意义。

关键词 甚低频;电小天线;接地损耗;地网;辐射效率

中图分类号 TN822[†].1

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2018)04-0483-07

DOI 10.13443/j.cjors.2018011701

Calculation and analysis of ground loss resistance for an electrically small VLF transmitting antenna

DAI Ganlai DONG Yinghui

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract To solve the low radiation efficiency of the very low frequency (VLF) electrically small transmitting antenna, which is caused by the low radiation resistance and ground loss, the computations of both the magnetic loss resistance and the electric field loss resistance inside or outside the uniform radiated ground network area are studied with analytical method. According to the method, the loss resistance in various regions of uniform radial ground network can be calculated. The computational results show that the loss of magnetic field resistance is the main part of the ground loss; besides, the uniform radial network is not the optimal mode for laying the ground grid under the condition that the total length of the ground net and its area radius are constant. Based on the above results, a new method for reducing ground loss resistance by laying uniform radial ground nets for various regions is proposed, which provides a new approach for further improving the radiation efficiency of electrically small antenna and is also of certain theoretical and practical value.

Keywords very low frequency (VLF); electrically small antenna; ground loss resistance; ground network; radiation efficiency

引言

甚低频是对潜通信的主要手段^[1],但甚低频天线的辐射电阻小^[2].为提高天线辐射效率,对地损耗的要求较高^[3-4].理论上,敷设地网越长、越密,接地损耗就越小,但工程建设中,考虑到施工成本及工程量,不可能无限制地增加地网长度和密度,因此在占地面积和地网总长一定的情况下,如何更有效降低损耗电阻是一个值得研究的问题.目前,国内外对甚低频发射天线地损耗电阻的计算主要依靠 FEKO、NEC、HFSS 等电磁数值仿真软件,这些软件在计算时需要将天线结构进行剖分,在计算甚低频天线输入电阻时,若剖分尺寸不同(均满足软件要求的段长度 $\lambda/1000 < l < \lambda/10$, λ 为工作波长)^[5-6],计算结果差别较大.因此这些电磁仿真软件在计算甚低频电小天线时,计算结果过于依赖剖分尺寸,这显然与实际不符,实际天线的电阻是与剖分尺寸无关的.基于以上问题,本文根据文献[7]甚低频天线的地损耗电阻主要来自天线近区场,地损耗由近区场天线地网区内磁场损耗和电场损耗及地网区外磁场损耗和电场损耗组成,通过解析式分别计算甚低频天线地网区内和区外的电磁场损耗电阻,并形成甚低频电小天线损耗电阻计算软件,可以计算不同电尺寸的直立天线,架设在不同地质条件下,敷设不同辐射状地网时的地损耗电阻.该计算方法不需剖分,计算结果基本正确,计算速度快,计算结果唯一,为大型甚低频天线地网设计提供了一种简单快捷的计算方法.

1 地损耗电阻计算方法

一个从底端馈电,天线高为 h 的直立电小天线置于电导率为 σ_g 的地面上,以天线为中心均匀敷设 n 根、敷设区域半径为 a 的辐射状地网,其相邻地网间隔为 $s = 2\pi\rho/n$, ρ 为地面任一点距天线根部的距离.如图 1 所示.

由于大地并非理想导体,在电磁场作用下,必然会产生损耗,损耗分为磁场损耗电阻 R_H 和电场损耗电阻 R_E .其中,磁场损耗是天线中的电流产生的磁场在地中感应的电流流经大地时发生的损耗,电场损耗是空间位移电流进入大地后受到的损耗.有效总损耗电阻 R_g 可表示为^[7]

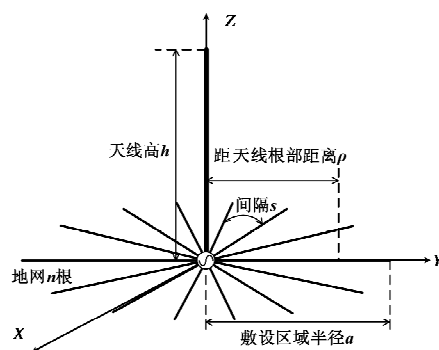


图 1 天线模型示意图

Fig. 1 Antenna model

$$R_g = R_H + R_E. \quad (1)$$

对于电小天线,损耗主要集中在天线近区,即 $\rho \leq \lambda/(2\pi)$ 的区域,若用 A 表示这个区域,则磁场损耗功率 P_H 和电场损耗功率 P_E 可表示为^[8]:

$$P_H = \int_A R'_H H_\varphi^2 dA, \quad (2)$$

$$P_E = \int_A R'_E J_z^2 dA. \quad (3)$$

式中: H_φ 表示天线周围地面上任一点的切向磁场; J_z 表示垂直于地面的传导电流密度,一般认为 J_z 等于垂直于地面的位移电流密度 J_d ,若用 E_z 表示垂直电场,则 $J_d = 2\pi f\epsilon_0 E_z$, f 为工作频率, ϵ_0 为自由空间介电常数; R'_H 和 R'_E 分别表示单位面积磁场损耗电阻和电场损耗电阻.

1.1 磁场损耗电阻计算方法

对于架设在地面上的高为 h 的电小天线,其有效高度^[9]

$$h_e = \frac{\lambda}{2\pi} \tan\left(\frac{\pi h}{\lambda}\right). \quad (4)$$

式中, λ 表示天线的工作波长.

则天线在地面任意位置产生的 H_φ 和 E_z 可表示为^[8]

$$H_\varphi(\rho) = \frac{I_0 h_e}{2\pi\rho \sqrt{\rho^2 + h_e^2}}, \quad (5)$$

$$E_z = \frac{jI_0}{4\pi^2 f\epsilon_0 h_e^2} \left[1 + \left(\frac{\rho}{h_e} \right)^2 \right]^{-1.5}. \quad (6)$$

式中, I_0 表示天线底端的输入电流.

根据文献[8],均匀辐射状地网区内单位面积大地 R'_H 可表示为

$$R'_H \approx \frac{2.1 \times 10^{-9} s^2 f^{1.5} \sigma_g^{0.5} \left(\lg \frac{s}{\pi d} \right)^2}{1 + 1.06 \times 10^{-6} s^2 f \sigma_g \left(\lg \frac{s}{\pi d} \right)^2 + 1.45 \times 10^{-3} s f^{0.5} \sigma_g^{0.5} \lg \frac{s}{\pi d}}. \quad (7)$$

式中, d 为地网导线直径.

地网区外单位面积大地 R'_H 可近似为^[8]

$$R'_H \approx 2 \times 10^{-3} f^{0.5} \sigma_g^{-0.5}. \quad (8)$$

式(7) 适合研究较密的地网区内的磁场损耗, 式(8) 在研究地网外或者敷设地网较疏时的磁场损耗是有效的^[10].

若研究分区域均匀辐射状地损耗, 可将天线地网区分为 i 部分敷设, 设第 i 部分地网均匀分布在距离天线根部 $a_i \sim a_{i+1}$ 处, 共 n_i 根, 地网最远敷设至距离天线根部 a 处, 如图 1 所示. 则第 i 部分地网区内的磁场损耗电阻可表示为

$$\begin{aligned} R_{H_{i-nei}} &= \frac{1}{I_0^2} \int_A R'_H H_\varphi^2 dA \\ &= \frac{2\pi}{I_0^2} \int_{a_i}^{a_{i+1}} R'_H H_\varphi^2(\rho) \rho d\rho, \end{aligned} \quad (9)$$

R'_{H_i} 中, $s = \frac{2\pi\rho}{n_i}$.

所以整个地网区内的磁场损耗电阻可表示为

$$R_{H_{-nei}} = \sum_i R_{H_{i-nei}}. \quad (10)$$

地网区外的磁场损耗电阻可表示为

$$\begin{aligned} R_{H_{-wai}} &= \frac{1}{I_0^2} \int_A R'_H H_\varphi^2 dA \\ &= \frac{2\pi}{I_0^2} \int_a^{\frac{\lambda}{2\pi}} R'_H H_\varphi^2(\rho) \rho d\rho, \end{aligned} \quad (11)$$

则总磁场损耗电阻

$$R_H = R_{H_{-nei}} + R_{H_{-wai}}. \quad (12)$$

1.2 电场损耗电阻计算方法

根据文献[7], 在 $h \gg s$ 的条件下, 单位面积电场损耗可表示为

$$R'_E = R_e(Z) = \frac{\bar{h}\sigma_g}{\sigma_g^2 + (2\pi f\epsilon_g)^2}. \quad (13)$$

式中: $\bar{h}$ 为地网等效埋地深度; ϵ_g 为大地介电常数.

甚低频频段, 一般大地都可满足 $\sigma_g \gg \omega\epsilon_g$, 所以式(13) 可简化为

$$R'_E \approx \frac{\bar{h}}{\sigma_g}. \quad (14)$$

一般来说, $\bar{h}$ 是不均匀的, 地网区内的 $\bar{h}$ ^[8] 可近似为

$$\bar{h} \approx s; \quad (15)$$

在地网区外, 可假定位于地面下 $\delta_g/\sqrt{2}$ 处的一理想

导电板^[10] 来计算电场损耗, 此时

$$\bar{h} = \frac{\delta_g}{\sqrt{2}}. \quad (16)$$

式中, $\delta_g = \left[\frac{2}{\omega\mu_g\sigma_g} \right]^{0.5}$ 是地的趋肤深度^[11], μ_g 是地的磁导率. 同理, 上述第 i 部分地网区内的电场损耗电阻可表示为

$$R_{E_{i-nei}} = \frac{2\pi}{I_0^2} \int_{a_i}^{a_{i+1}} R'_E J_z^2 \rho d\rho, \quad (17)$$

R'_{E_i} 中, $s = \frac{2\pi\rho}{n_i}$.

所以整个地网区内的电场损耗电阻可表示为

$$R_{E_{-nei}} = \sum_i R_{E_{i-nei}}. \quad (18)$$

地网区外的电场损耗电阻可表示为

$$R_{E_{-wai}} = \frac{2\pi}{I_0^2} \int_a^{\frac{\lambda}{2\pi}} R'_E J_z^2 \rho d\rho. \quad (19)$$

即总电场损耗电阻

$$R_E = R_{E_{-nei}} + R_{E_{-wai}}. \quad (20)$$

下面根据以上分析及公式, 计算不同地网敷设情况下的地网损耗电阻.

2 计算实例及分析

本节利用上述解析方法计算一种均匀辐射状地网和一种分区域均匀辐射状地网的地损耗电阻. 均匀辐射状地网计算模型为: 大地电导率为 0.01 S/m, 天线高 200 m, 敷设 100 根线径为 0.003 m、敷设区域半径为 1 400 m 的地网, 地网总长度为 140 km. 分区域均匀辐射状地网计算模型为: 大地电导率为 0.01 S/m, 天线高 200 m, 线径为 0.003 m, 地网分 3 部分敷设, 从靠近天线根部开始依次为第 1 部分 400 m、100 根; 第 2 部分 600 m、100 根; 第 3 部分 400 m、100 根, 地网总长度仍为 140 km. 从两种模型结构看, 它们的地网结构是相同的, 计算结果一致, 说明利用解析式进行分区域计算地损耗电阻是可行的. 本文又利用 FEKO 对上述分区域均匀辐射状地网进行了仿真计算, 仿真时天线按照段长 $\lambda/400$, 地网按照段长 $\lambda/200$ 进行剖分. 以上 2 种模型在不同频率下的损耗电阻计算结果如表 1 所示. 用 FEKO 仿真的模型如图 2 所示.

表 1 不同频率下的损耗电阻
Tab. 1 Loss resistance at different frequencies

频率/kHz	分区域地网				总损耗/mΩ	均匀地网	
	第 1 部分 损耗/mΩ	第 2 部分 损耗/mΩ	第 3 部分 损耗/mΩ	地网区外 损耗/mΩ		仿真结 果/mΩ	传统解析法 计算损耗/mΩ
20	0.74	28.99	2.45	0.75	32.93	33.89	32.91
21	0.79	30.57	2.53	0.73	34.62	35.70	34.60
22	0.84	32.17	2.62	0.70	36.33	37.48	36.30
23	0.89	33.77	2.71	0.70	38.07	38.93	38.00
24	0.94	35.37	2.79	0.63	39.73	40.72	39.70
25	1.00	37.00	2.87	0.59	41.46	42.54	41.40

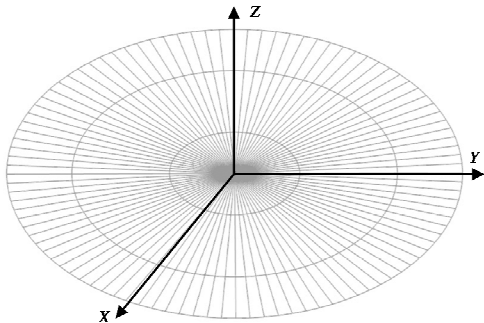


图 2 分区域地网仿真示意图
Fig. 2 Sub-regional ground network simulation

从表 1 可看出,本文所用的解析方法与仿真结果吻合较好,即验证了该方法是正确的。

图 3 是天线高度不同时,敷设 300 根线径为 0.003 m、敷设区域半径为 1 300 m 的地网,电场损耗电阻与总接地损耗电阻之比。假设大地电导率为 0.01 S/m。从图中可看出,同等情况下天线越高或工作频率越高,电场损耗占总损耗的比就越小。为了提高辐射电阻,甚低频天线一般都要超过 200 m,从图中看出电场损耗占比不超过 10%。对于 250 m 天线占比不超过 5%,大型甚低频天线一般高度都会超过 250 m,因此计算直立甚低频发射天线的接地损耗电阻时,电场损耗电阻可忽略,主要考虑磁场损耗电阻即可。

当工作频率为 25 kHz 时,根据式(5),用 Matlab 计算出长 250 m 的天线底端输入电流为 1 A 时,天线近区地面磁场分布,如图 4 所示。可以看出在天线附近磁场最大,但是随着离天线根部距离的增加衰减很快,因此在天线附近敷设较密的地网很有必要。

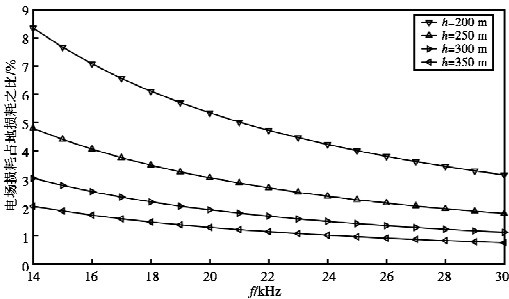


图 3 电场损耗电阻占接地损耗电阻比
Fig. 3 Ratio of electric field loss resistance to ground loss resistance

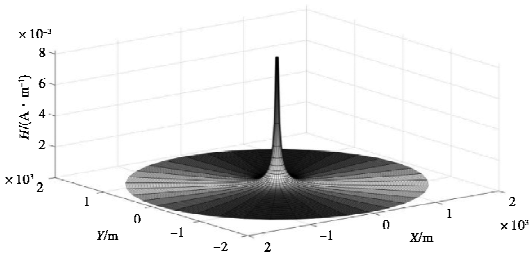


图 4 天线近区内 25 kHz 地面磁场分布
Fig. 4 Distribution of magnetic field at 25 kHz in near field

磁场损耗电阻 R_H 可分为地网内的磁场损耗电阻 R_{H_nei} 和地网外的磁场损耗电阻 R_{H_wai} 两部分,表 2 给出了不同地面类型,均匀敷设地网时地网内和地网外的磁场损耗电阻。由于地网和大地是并联的,且地网可看作是理想导体,在地网区内,当大地电导率增加时,流入大地的磁场感应电流也会相应增大,造成的损耗就会变大;在地网区外,只有大地损耗,所以当大地电导率增加时,造成的损耗会变小。

表 2 不同地面类型下地网内和地网外的
磁场损耗电阻(均匀辐射状敷设)

Tab.2 Magnetic field losses resistance

(uniform radial laying) in different ground types

$a=1\,300\text{ m}, n=300, d=0.003\text{ m}, f=25\text{ kHz}, h=250\text{ m}$

地面类型	$\sigma_g/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	区内损耗	区外损耗
		$R_{H_{\text{nei}}}/\text{m}\Omega$	$R_{H_{\text{wai}}}/\mu\Omega$
干土	0.001	4.92	3 933.200
湿土	0.010	9.96	1 243.800
海水	4.000	13.91	62.189

若天线架设在海岛上,假设天线架设地网区为湿土,电导率为 0.01 S/m,地网区外为海水,电导率为 4 S/m. 图 5 给出了工作频率 $f=25\text{ kHz}$ 条件下,天线高 250 m,敷设 300 根线径为 0.003 m、敷设区域半径为 1 300 m 的地网,单位圆环上的磁场损耗电阻随与天线根部距离不同的分布图,曲线所围面积为总的磁场损耗电阻. 从图中可看出,由于地网区外电导率较大、磁场强度又较小,地网区外(即 $1\,300\text{ m}<\rho<\lambda/2\pi$)的磁场损耗几乎可以忽略不计,大量的损耗集中在地网区内 30~400 m. 在地网区内 400~1 300 m 的地网末端部分,由于磁场衰减较快,距离天线根部的单位圆环上损耗电阻下降也很快. 经计算,超过 60% 的损耗在半径为 400 m 的地网区内,半径为 400~800 m 损耗约占 25%,半径为 800~1 300 m 损耗约占 15%.

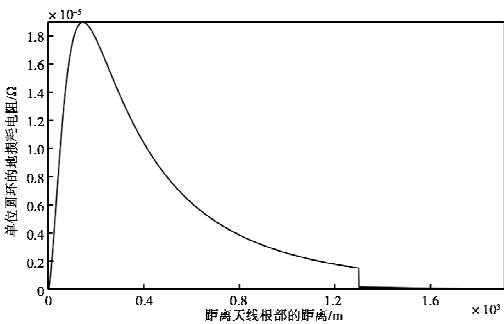


图 5 单位圆环上的磁场损耗电阻分布图

Fig.5 Distribution of magnetic field loss resistance
on unit ring

假设天线高 250 m,地网敷设区域半径为 1 300 m. 以天线为中心,把地网分为三个区域进行铺设:第 1 部分 30 m,第 2 部分 635 m,第 3 部分 635 m,在地网总长为 390 km 不变的情况下,改变各个部分的

地网根数. 假设地网区内的大地电导率为 0.01 S/m. 表 3 给出了 10 种地网的敷设方式.

表 3 10 种地网的敷设方式

Tab.3 The laying of 10-type ground networks

编号	第一部分		第二部分		第三部分	
	长度 a_1	根数 n_1	长度 a_2	根数 n_2	长度 a_3	根数 n_3
1	30	300	635	300	635	300
2	30	300	635	350	635	250
3	30	300	635	420	635	180
4	30	300	635	430	635	170
5	30	300	635	440	635	160
6	30	300	635	450	635	150
7	30	300	635	460	635	140
8	30	300	635	470	635	130
9	30	300	635	480	635	120
10	30	300	635	600	635	0

表 4 给出了在保持地网总长度为 390 km、地网敷设区域半径为 1 300 m 不变的情况下,一根高 250 m 的天线架设在电导率为 0.01 S/m 的地面上,分别敷设上述 10 种形式地网,工作在不同频率时地网内磁场损耗电阻值. 可以看出, $f=25\text{ kHz}$ 时第 1 种形式(300 根均匀辐射状的地网敷满整个地网区)地损耗电阻较大,为了降低损耗提高辐射效率,可将第 1 种形式末端部分地网材料挪至损耗较为集中的中段位置以有效降低地网内的磁场损耗电阻. 此时,第 6 种形式减少损耗最多. 在 $f=20\text{ kHz}$ 和 $f=30\text{ kHz}$ 时,也能得出类似的结论. 因此,对于电小甚低频发射天线,在地网总长度和敷设区域半径不变时,敷设均匀的辐射状地网并不是最佳形式,最佳形式应该为内段较密,中段最密,末端较疏. 在上述 3 种频率下,减少地损耗电阻最多的地网敷设形式基本可认为是一样的,且工作频率越高接地损耗电阻减少越多.

以上是将地网分成三个部分的情况. 表 5 给出了工作频率为 25 kHz 时,将地网分布成两部分(0~650 m,650~1 300 m),不同敷设形式下地网区内磁场损耗电阻(其余条件均不变). 此时,第 6 种形式减少损耗最多. 但在地网最外端减少相同根数加到内侧的情况下,减少接地损耗幅度不如将地网分成 3 段的情况. 这是由于靠近天线根部附近的地网本身已经敷设得很密,接地损耗电阻已经很小,继续加密根部附近的地网密度不能大幅减少该区域的损耗电阻.

表 4 不同地网形式下地网内磁场损耗电阻值

Tab. 4 Loss of magnetic field resistance in different ground network at different frequencies

地网编号	频率为 25 kHz		频率为 20 kHz		频率为 30 kHz	
	$R_{H_nei}/m\Omega$	比第 1 种减少百分比/%	$R_{H_nei}/m\Omega$	比第 1 种减少百分比/%	$R_{H_nei}/m\Omega$	比第 1 种减少百分比/%
1	9.372 0	0.00	7.063 7	0.00	11.784 0	0.00
2	7.834 5	16.40	5.944 5	15.84	9.802 1	16.82
3	6.883 4	26.55	5.329 5	24.55	8.481 1	28.03
4	6.832 6	27.10	5.311 3	24.81	8.393 1	28.78
5	6.800 3	27.44	5.308 7	24.85	8.326 5	29.34
6	6.785 7	27.60	5.321 2	24.67	8.280 2	29.73
7	6.788 3	27.57	5.348 6	24.28	8.253 4	29.96
8	6.807 6	27.36	5.390 7	23.68	8.245 3	30.03
9	6.843 1	26.98	5.447 3	22.88	8.255 4	29.94
10	8.270 6	11.75	7.075 2	-1.63	9.446 8	19.83

表 5 不同地网形式下地网内磁场损耗电阻值

Tab. 5 Loss of magnetic field resistance in different ground network at 25 kHz

地网形式					R_{H_nei} / $m\Omega$	比第 1 种减少百分比/%
编号	第一部分		第二部分			
	长度 a_1	根数 n_1	长度 a_2	根数 n_2		
1	650	300	650	300	9.372 0	0.00
2	650	350	650	250	7.850 5	16.23
3	650	420	650	180	6.942 7	25.92
4	650	430	650	170	6.900 2	26.37
5	650	440	650	160	6.876 8	26.62
6	650	450	650	150	6.871 7	26.68
7	650	460	650	140	6.884 5	26.54
8	650	470	650	130	6.914 7	26.22
9	650	480	650	120	6.961 9	25.72
10	635	600	635	0	8.648 5	7.71

在保持地网总长度和地网敷设场地不变的情况下, $f=25\text{ kHz}$ 时, 将地网区域分成 4 部分, 从靠近天线根部开始依次为: 第 1 部分 30 m、300 根; 第 2 部分 370 m、500 根; 第 3 部分 600 m、300 根; 第 4 部分 300 m、54 根, 地网总长度仍为 390 km. 计算出地网内磁场损耗电阻为 6.495 m Ω , 较均匀敷设辐射状地网的地网区内磁场损耗减少了 30.70%. 因此, 越精密的地网敷设形式(地网分区域敷设越多)对降低接地损耗电阻效果越明显.

3 结 论

利用解析法计算甚低频发射天线地损耗电阻方法正确, 且计算速度比电磁仿真数值计算软件快很多, 计算时间短. 从该解析法的分析和计算结果得出

以下结论: 1) 对高于 250 m 的电小直立甚低频发射天线, 其电场损耗电阻可忽略不计, 主要考虑磁场损耗电阻. 2) 架设天线时应选择地网区内地电导率低, 地网区外电导率高的地区, 因此海岛或半岛是甚低频发射天线较为理想的建设场地. 3) 在地网总长度和天线场面积一定的情况下, 敷设均匀的辐射状地网并不是最佳形式, 最佳形式应该为分区域敷设地网. 4) 地网分区域敷设越多, 就越能获得较小的接地损耗电阻, 在设计地网时, 要把握的一个原则是加密地网中段部分、减密地网末端部分. 5) 对于不同频率, 敷设天线地网的最佳形式是可认为近似不变.

参考文献

[1] 董颖辉, 柳超, 代甘来, 等. 改进加顶结构的甚低频发信天线阻抗特性分析[J]. 电波科学学报, 2014, 29(4): 763-768.
DONG Y H, LIU C, DAI G L, et al. VLF transmitting antenna impedance characteristic based on top-load configuration[J]. Chinese journal of radio science, 2014, 29(4): 763-768. (in Chinese)
[2] 柳超, 王永斌, 高俊. 甚低频通信[M]. 武汉: 海军工程大学出版社, 2004: 21.
[3] POLJAK D, DORIC V. Wire antenna model for transient analysis of simple grounding systems, part I: The vertical grounding electrode[J]. Progress in electromagnetics research, 2006, 64: 149-166.
[4] POLJAK D, DORIC V. Wire antenna model for transient analysis of simple grounding systems, part II: The horizontal grounding electrode[J]. Progress in electromagnetics research, 2006, 64: 167-189.

- [5] 何汉林,魏汝祥,李卫军. 数值分析[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1999:2-5.
- [6] 叶尚贵,李在贵. 天线结构设计[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1986:20-54.
- [7] 梁高权. 甚低频波与超低频波的辐射与传播[M]. 武汉:海军工程大学出版社,2002:71-88.
- [8] WATT A D. 甚低频无线电工程[M]. 北京:国防工业出版社,1973:51-68.
- [9] 宋铮,张建华,黄治. 天线与电波传播[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003:14-15.
- [10] 柳超,梁玉军,刘其中,等. 甚低频 T 型天线阵地网损耗电阻的分析与计算[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),2008,35(6):1026-1030.
LIU C, LIANG Y J, LIU Q Z, et al. Analysis and calculation of ground loss resistance for VLF T-type antenna array with the ground screen[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(6): 1026-1030. (in Chinese)
- [11] 王一平. 工程电动力学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007:186.

作者简介

代甘来 (1992—),男,湖北人,海军工程大学电子工程学院硕士研究生,研究方向为通信天线技术。

董颖辉 (1971—),女,陕西人,海军工程大学电子工程学院副教授,博士,研究方向为信号处理及通信天线技术。