

一种基于粒子群算法的长波天线顶负载优化研究

李海波

中国人民解放军91710部队, 吉林 和龙

收稿日期: 2022年11月22日; 录用日期: 2022年12月22日; 发布日期: 2022年12月31日

摘要

长波发射天线一般可等效为单极子顶加载天线, 顶负载起着改善电流分布、增大天线静态电容及功率容量、提高天线有效高度等效果, 在天线设计中起着关键作用, 但如何平衡各项指标之间的关系, 保证最终设计的最优化, 这是需要重点研究关注的问题。本文采用粒子群算法对顶负载设计状态进行优化, 并通过计算实例进行计算验证, 可以实现一定限定范围内的最优化设计, 为实际工程设计提供了研究基础及思路。

关键词

长波天线, 粒子群算法, 顶负载

An Optimization of Long-Wave Antenna Top Load Based on Particle Swarm Optimizer

Haibo Li

Unit 91710 of the People's Liberation Army, Helong Jilin

Received: Nov. 22nd, 2022; accepted: Dec. 22nd, 2022; published: Dec. 31st, 2022

Abstract

The Long-wave transmitting antennas are generally equivalent to monopole top loading antennas. Its top load plays the role of improving the current distribution, increasing the static capacitance and power capacity of the antenna, and increasing the effective height of the antenna. Top load plays a key role in antenna design. However, how to balance the relationship between various indicators and ensure the optimization of the final design, this is a problem that needs to be focused on research. In this paper, the particle swarm optimization algorithm is used to optimize the design state of the top load, and the calculation example is used to verify the calculation, which can

realize the optimal design within a certain limited range, and provide the research basis and ideas for the actual engineering design.

Keywords

Long-Wave Antenna, Particle Swarm Optimizer, Top Load

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

长波发射天线工作频率低，对应波长长，由于受工程实现及客观条件限制，天线高度受限，虽规模比较庞大，但天线尺寸与工作波长相比仍属于电小天线[1]。

在长波频段，由于电小天线的原因，单极子直立天线上电流分布近似为线性分布，天线顶端电流接近于零，因此天线顶端与地面之间的电容很小，导致天线的功率容量较小，带宽较窄。为了增大天线顶端与地面之间的电容，通常需要在天线的顶端加载面积庞大的顶负载，形成伞形天线来改善电流分布、增大天线静态电容、增大功率容量、提高天线系统的有效高度、降低天线自谐振频率，长波天线单元结构如图1所示。

顶负载的设计如何实现在静态电容、功率容量、有效高度及自谐振频率之间的平衡，保证最终设计的最优化，是需要重点研究关注的问题。本文采用粒子群优化算法对天线各项参数进行统一优化，争取获得在实际工程条件限制下的局部最优解[2] [3]。

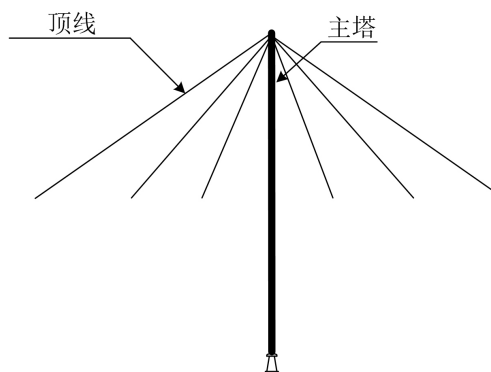


Figure 1. Schematic diagram of long wave antenna unit structure
图 1. 长波天线单元结构示意图

2. 顶负载优化分析方法

2.1. 顶负载设计理论

顶负载一般最常采用的形式为辐射状顶线，顶线根数、顶线长度、顶线与天线主塔夹角等参数的选择，影响着天线自谐振频率等参数；长波天线一般将自谐振频率设计的略小于工作频率，当顶线长度一定，即顶负载面积一定时，可以在一定限度内增加顶线的数量，起到增加等效面积的作用，随着根数的增

加, 天线顶线组成的平面越趋近于等效理想导电平面; 当顶线根数继续增加时, 顶负载的电容增长变得缓慢, 并趋近于极限。因此需顶线的设计需在考虑诸多因素的情况下综合考虑, 以实现最优化处理[4] [5]。

在顶负载设计时, 需要分析其基本原理及理论公式, 在经典长波理论中, 伞形天线一般由伞顶和垂直支撑体两部分组成。伞形天线的电位方程为:

$$\varphi_1 = P'_{11}Q_1 + P_{12}Q_2 \quad (1)$$

$$\varphi_2 = P_{12}Q_1 + P'_{22}Q_2 \quad (2)$$

式中: Q_1 ——伞面上的电荷, Q_2 ——垂直部分上的电荷。

根据天线电位关系:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (3)$$

联立求解上两式, 就能够得到 Q_1 , Q_2 的相对表示式和各部分的电容, 从而求得天线总的静态电容

$$C_A = C_1 + C_2 \quad (4)$$

式中 $C_i = Q_i/\varphi_i$ ($i=1,2$), 其中 C_1 为水平部分电容, C_2 为垂直部分电容。

电位系数计算式如下:

$$P'_{11} = P_{11} + \frac{1}{R} \cdot \frac{2}{n} \ln \frac{\pi R \sin \theta}{4nr} \quad (5)$$

$$P_{11} = \frac{1}{R} \left[\frac{\pi}{2} + 2 \ln \left(\cot \frac{\theta}{2} \right) - 2.3(\cos \theta)^{1.17} - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2h}{R} - \cos \theta \right)^2 + 0.5 \sin^2 \theta}} \right] \quad (6)$$

$$P_{12} = \frac{1}{R} \left[F\left(\frac{h}{2}\right) - F\left(\frac{3h}{2}\right) \right] \quad (7)$$

$$F(y) = \frac{2(R - 2y \cos \theta)}{y + \sqrt{y^2 + R^2 - 2yR \cos \theta}} + \frac{2y \cos \theta}{R} \ln \frac{(R - y \cos \theta) + \sqrt{y^2 + R^2 - 2yR \cos \theta}}{y(1 - \cos \theta)} \quad (8)$$

$$P_{22} = \frac{2}{h} \left(\ln \frac{h}{r_0} - 1 \right) \quad (9)$$

上式中: R ——伞线长度, θ ——伞线夹角, r ——伞线半径, h ——伞塔高度, r_0 ——伞塔半径, n ——伞线根数。

伞形天线的有效高度表示为:

$$h_e = h \left(1 - \frac{C_2}{2C_A} \right) - \left(1 - \frac{C_2}{C_A} \right) \left(\frac{2}{3} R \cos \theta + \frac{2}{3} \frac{\Delta}{\sin \theta} \right) \quad (10)$$

上式便是考虑了垂度影响的伞形天线的有效高度计算公式。其中: C_2 ——垂直部分电容, C_A ——天线总电容, R ——伞线长度, θ ——伞线夹角, Δ ——伞线垂度, h ——塔高度。

由于长波天线的输入电抗一般都是容抗, 故只要求出天线总的静态电容 C_A , 利用下式就能得到给定工作频率下的电抗:

$$X_A = \frac{1}{\omega C_A} \quad (11)$$

式中： $\omega = 2\pi f$ 为角频率， C_A 以法拉为单位。在天线的高度与波长比小于 0.1 (即 $\frac{h}{\lambda} < 0.1$) 的情况下，上式能较准确的求出电抗。

上述公式表达出了顶负载设计对自谐振频率及有效高度的影响，通过对其状态分析计算，可以在一定限定条件下的最优化。

2.2. 粒子群算法优化

PSO 算法是基于群体智慧的演化算法，它是由 M 个粒子组成的群体在 D 维空间搜索最优解的过程。在搜索时参考自身历史最优位置和群体历史最优位置进行迭代。每个粒子在每次迭代中有位置和速度 2 个 D 维向量，即： $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ ， $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ ， $1 \leq i \leq M$ ， $1 \leq d \leq D$ 。

基本 PSO 算法的迭代公式为：

$$V_{id}^{k+1} = \omega \cdot V_{id}^k + c_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest^k - X_{id}^k) \quad (11)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1}$$

式中： ω 为惯性权重； c_1 和 c_2 为学习因子，又称为加速因子； V_{id}^k 为第 i 个粒子当前运动速度向量； X_{id}^k 为第 i 个粒子的位置向量； $pbest_i$ 为第 i 个粒子自身历史的最优位置向量； $gbest_i$ 为群体的最优位置向量； $rand_1$ 和 $rand_2$ 为 0 到 1 之间的随机数； k 为第 k 次的迭代；下标 d 为向量的第 d 维。

PSO 算法的流程如下图 2 所示，其基本过程总结如下：

- 1) 随机生成 N 个粒子，初始化各粒子的速度、位置以及个体最优值和全局最优值；
- 2) 计算所有粒子适应度值，寻找个体和全局最优解；
- 3) 判断是否达到最优解或达到迭代次数，若达到则转(4)，否则转入(2)；
- 4) 输出最优解，结束程序。

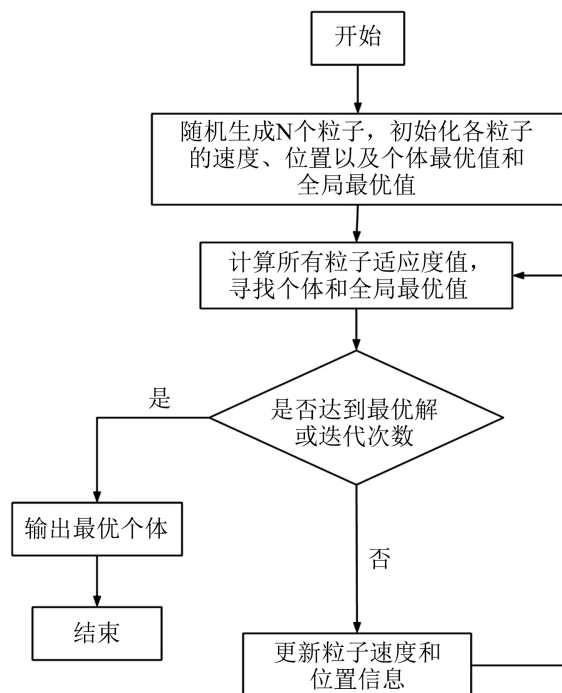


Figure 2. Flow chart of particle swarm optimization
图 2. 粒子群算法流程图

将上节所述公式加入优化算法程序中，对顶线的根数、长度、夹角进行优化，在其他条件限定的情况下，得到最优解。

3. 地损耗电阻的数值仿真计算

为了验证上述算法优化程序，在一定限制条件下建立一个基本模型，天线高度 200 m，工作频点 150 kHz，对天线顶线的各项参数进行优化计算(图 3)。



Figure 3. Interface of particle swarm optimization
图 3. 粒子群算法优化界面

针对顶线的根数，长度、夹角等参数，进行优化，得到其变化引起的性能变化如下图 4~6。

从优化结果的图中可以看出，顶线各参数对天线电气性能的影响，随着顶线长度的增长，天线的有效高度与自谐振频率会降低；随着顶线根数的增加，天线的有效高度会增加，而自谐振频率会降低；随着天线与主塔之间的顶线夹角的增加，天线的有效高度会增加，而自谐振频率会降低；根据上述优化计算结果，结合实际工程需求的限制条件，综合考虑自谐振频率、有效高度、功率容量等参数选取，可获得在一定范围内的最优解。

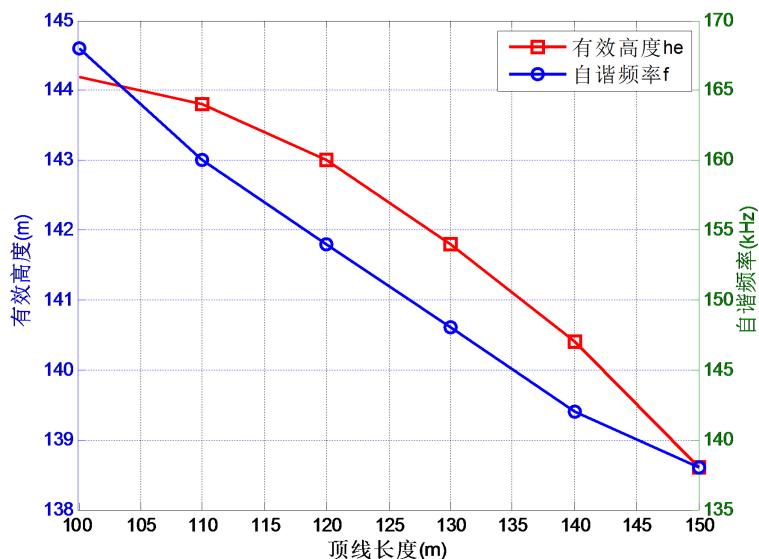


Figure 4. Influence of top wire length on electrical properties
图 4. 顶线长度对电性能的影响

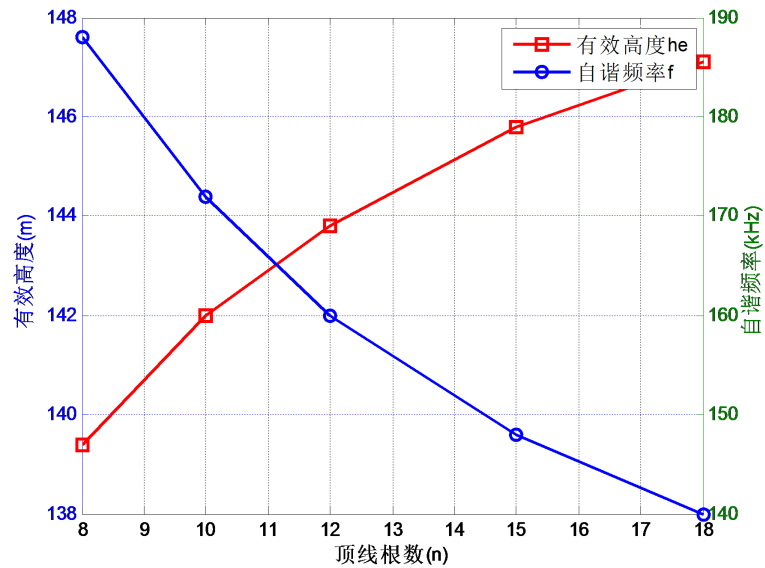


Figure 5. Influence of the number of top wire roots on electrical properties

图 5. 顶线根数对电性能的影响

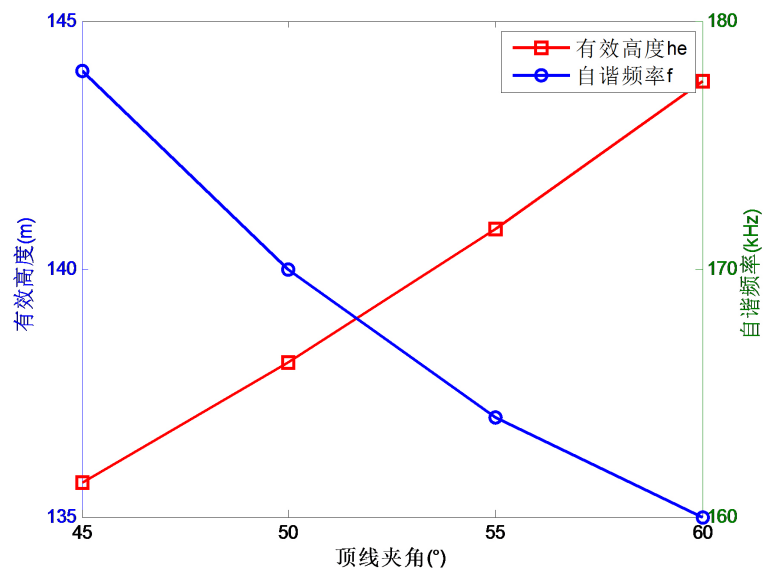


Figure 6. Influence of angle of top wire on electrical properties

图 6. 顶线夹角对电性能的影响

4. 总结

长波天线的顶负载设计是天线设计中的重要部分，采用粒子群算法对其关键参数进行优化分析，确保在成本可控的基础上，可以实现一定限定范围内的最优化设计，为实际工程设计提供了研究基础及思路。

参考文献

- [1] 梁高权. 甚低频波和超低频波的辐射与传播[M]. 武汉: 海军工程大学学报编辑部, 2002.
- [2] 杨永健, 王晟达, 马建, 等. 基于改进粒子群算法的共形阵列天线综合[J]. 现代雷达, 2012, 34(12): 64-67+73.

- [3] 王孝华, 李丽华, 翟琦, 王永斌. 长波天线自动调谐研究及算法仿真[J]. 通信技术, 2018, 51(12): 2853-2860.
- [4] 柳超. 甚低频发射天线研究综述[C]//2021年全国天线年后论文集. 北京: 中国电子学会, 2021.
- [5] 严亚龙, 柳超, 董颖辉, 吴华宁. 不同工况对甚低频发射天线电性能影响的分析方法[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6): 98-105.