电小天线宽带匹配网络的优化设计

陈爱新 张艳君 姜铁华 苏东林

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 提出了一种新型的适合于电小天线匹配的网络拓扑结构并成功地进行了验证. 采用了实频数据法和直接优化法相结合的优化方法来设计电小天线的宽带匹配网络. 从电小天线的特性出发,分别采用全段匹配和分段匹配的方法设计其网络拓扑结构,利用算法的寻优特性针对电小天线进行宽带匹配设计,显著提高了电小天线的使用效率和性能,并且利用仿真软件进行了计算和验证,最后对这两种方法进行了比对. 设计结果表明:经过优化设计后,该电小天线的电压驻波比在 100～180 MHz 内小于 2.5 且其效率基本上大于 30%. 所提出的网络拓扑结构非常适用于电小天线的宽带匹配,在设计电小天线以及其它天线的宽带匹配网络上具有很大的应用前景.

关 键 词: 宽带网络; 加载; 效率

中图分类号: TN 820

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)11-1311-04

Optimal design of broadband matching network for electrically small antennas

Chen Aixin Zhang Yanjun Jiang Tiehua Su Donglin

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A novel network topology for electrically small antennas was presented and verified successfully. An optimal design approach which combines the real frequency method and the direct numerical optimization was used to design the broadband matching network. According to the characteristic of an electrically small antenna, a network topology which can improve the efficiency of the electrically small antenna observably was designed with two methods of full-band and piecewise-band frequency matching, and the design result was computed and validated with simulation software. Finally, the two methods were compared. Results show that the voltage standing wave ratio of the antenna is below 2.5 and its efficiency is above 30% in 100～180 MHz by the optimal design. The proposed network topology is especially useful in the matching of electrically small antennas and allows a good prospect of application on the designing of broadband matching networks for electrically small antennas.

Key words: broadband networks; loading; efficiency

随着移动通信技术、空间技术和超宽带电子技术的发展,各种电子设备均向小型化与微型化方向发展,因此应用在移动平台(舰载、车载、机载等)的通信天线不断提出小型化的要求. 众所周知,电小天线的阻抗特性非常恶劣,与传输线匹配相当困难,如果是宽带匹配更是难上加难,同时其使用效率非常低,针对电小天线阻抗特性设计合适的匹配网络相当重要. 文献[1]对展宽天线频带的方法进行了详细的综述. 文献[2－6]分别采用不同的数值方法或优化方法对匹配网络进行设

收稿日期: 2008-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60831001,F010610)

作者简介: 陈爱新(1970－),男,河北安国人,副教授,axchen@buaa.edu.cn.

计.设计天线宽带匹配网络的相关著作很多,但是关于电小天线宽带匹配网络设计方面的工作很少,尤其是阻抗变化剧烈和辐射电阻过低的电小天线.至今,电小天线仍然面临改善匹配带宽和提高效率等方面的困难.

本文提出了一种新型的适合于电小天线匹配的网络拓扑结构,该结构主要针对于电小天线的匹配,并且结合优化算法可以在展宽天线频带的同时大幅度提高该天线的效率.该网络拓扑最大的优点是对天线的阻抗限制比较小,尤其适用于当仅用无耗元件不能对天线进行匹配时的情况.结果表明该网络拓扑结构在设计电小天线以及其它天线的宽带匹配网络上具有很大的应用前景.

1 电小天线的网络拓扑结构

电小天线实质上是辐射较弱的电感性或电容性元件,因此可以简单地等效为电抗元件和电阻元件的串联或者并联电路.因此可以采用集总元件来补偿电小天线的输入电抗.本文提出了一种新型的由集总元件组成的网络拓扑结构,该结构尤其适用于电小天线的匹配.该网络拓扑结构如图1所示.

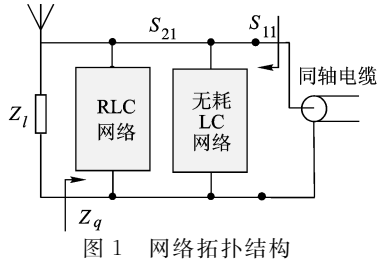


图1 网络拓扑结构

图1所示的网络拓扑结构包含一个阻尼网络,并且当在宽频带范围内仅用无耗元件无法对天线进行匹配时,可以采用该网络结构对天线进行匹配.采用RLC阻尼网络可以改善天线的阻抗特性,更利于天线进行匹配,因此可以对天线的阻抗进行一定的补偿.

利用阻尼网络对天线进行加载时,该网络可以与天线串联也可以与天线并联.与天线串联的RLC阻尼网络可以改善天线的阻抗特性,使阻抗曲线变得平坦以利于匹配;然而,与天线并联的可以把天线的阻抗变换成一种新的形式,不仅改善了天线端口的阻抗特性,也明显地降低了电小天线实部和虚部之间的对比.因此,在本文中,采用并联到天线底部的RLC阻尼网络结构形式来设计该电小天线的宽带匹配网络.

附加的L,C阻尼网络的R,L,C元件值需通过优化算法来优化得到.该网络拓扑结构适用于当仅用无耗元件无法对电小天线进行匹配时,尤其当天线的阻抗实部相对于其虚部很小时的情况.采用该网络拓扑结构来设计电小天线的宽带匹配网络,可以在有效地展宽电小天线带宽的同时,大幅度地改善该天线的效率.

采用实频数据法和直接优化法相结合的方法来优化和综合该网络拓扑结构.优化目标可同时设为最大电压驻波比 ρ 和转换增益 G_T.优化函数为

$$f=\min\{\max_{i=1,\cdots,N}[\rho(\omega_i)]\} \tag{1}$$

$$G_T=\max_{i=1,\cdots,N}\left\{\frac{P_2(\omega_i)}{P_1(\omega_i)}\right\}=\max_{i=1,\cdots,N}\left\{\frac{S_{21}(\omega_i)S_{21}^*(\omega_i)}{1-S_{11}(\omega_i)S_{11}^*(\omega_i)}\right\} \tag{2}$$

其中 ω_i,$i=1,\cdots,N$ 为通带内 N 个频率点;$P_1(\omega_i)$,$P_2(\omega_i)$分别为馈线端的平均输入功率和负载吸收的平均功率;$S_{11}(\omega_i)$,$S_{21}(\omega_i)$分别表示馈线输入端的反射系数和馈线到负载的传输系数.

1.1 直接优化法与实频数据法

直接优化法基本思想为对加在负载和信号源之间的宽带匹配网络进行优化来得到输入端的电压驻波比最小值[7].如图1,可知:

$$\rho=\frac{1+|\Gamma(\omega)|}{1-|\Gamma(\omega)|} \tag{3}$$

$$|\Gamma(\omega)|=\frac{|Z_{11}(\omega)-50|}{Z_{11}(\omega)+50|}\quad i=1,2,\cdots,M \tag{4}$$

其中 $Z_{11}(\omega)$为从馈线端看进去的输入阻抗.

为了使带内 ρ 最小,在使用最优化算法时,可选取目标函数 $f(p_1,p_2,p_3)$为

$$f(p_1,p_2,p_3)=\sum_{i=1}^{M}W(\omega)\cdot|\Gamma(\omega)|^2 \tag{5}$$

式中,p_1,p_2,p_3 分别代表T型或Π型网络支路上的元件值;$W(\omega)$为加权函数,在优化中起辅助作用,通过调整加权函数,可调整带内 ρ 曲线的起伏情况.通过优化计算,使目标函数最小化.直接优化法原理简单,方法直观,但其对网络拓扑依赖性大,如果网络拓扑选择不当,可能导致最优解被排除在可行域之外.

1.2 实频数据法

实频数据法基本思想即利用优化算法,寻找待求 $R_q(\omega)$,使带内 G 最大最平坦;然后由$R_q(\omega)$求解 $Z_q(s)$,最后由 $Z_q(s)$的表达式综合出具体的网络元件值[7-9];如图1,从天线负载向信号源看去的阻抗函数为策动点阻抗函数,记为$Z_q(s)$,则

在复平面内有

$$Z_q(s)\mid_{s=j\omega}=Z_q(j\omega)=R_q(\omega)+jX(\omega) \quad (6)$$

假定 $Z_q(s)$ 为最小电抗函数,则 $R_q(\omega)$ 和 $X_q(\omega)$ 满足希尔伯特变换对,即

$$\left.\begin{aligned} R_q(\omega)&=R_q(\infty)-\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{X_q(\lambda)}{\lambda-\omega}d\lambda\\ X_q(\omega)&=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{R_q(\omega)}{\lambda-\omega}d\lambda \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

利用上式可求解出 $Z_q(s)$,而在输入端口可以将网络转换功率增益 G 表示为

$$G(\omega^2)=\frac{4R_q(\omega)R_l(\omega)}{[R_q(\omega)+R_l(\omega)]^2+[X_q(\omega)+X_l(\omega)]^2} \quad (8)$$

实频数据法中待设的网络用其策动点阻抗函数表示,从根本上克服了直接优化法的缺陷,但其计算比较复杂,综合出的网络结构比较单一,尤其在折线逼近和有理函数拟合过程中容易产生较大的误差.因此,本文采用实频数据法和直接优化法相结合的方法,取长补短,来设计该电小天线的匹配网络,具体步骤为:①采用加载和匹配网络相结合的方法,首先根据实际情况,经过理论分析之后,在天线底端插入一个附加的阻尼网络,对天线的阻抗数值进行修正,使其利于匹配;②把天线和阻尼网络看作为一个负载,利用实频数据法设计其无耗匹配网络,该匹配网络包含一个阻抗变换器;③固定该阻抗变换器,利用直接优化法进行设计其无耗匹配网络,优化出最佳的网络结构形式.

2　设计结果与分析

选用集总元件来设计宽带匹配网络,这种匹配网络主要是无源的,由电抗元件组成 L 型、T 型、Π 型网络,它的主要优点是体积小、设计灵活、使用方便等.本文选择的负载对象是 100～180 MHz 的机载共形电小天线,其中该天线的最大高度仅为 $0.1\lambda_{max}$.需达到的目标是:设计该电小天线的匹配网络,使得加入匹配网络后天线的电压驻波比在通带内低于 2.5 和最大限度地改善该天线的效率和性能.

2.1　匹配前

图 2 为匹配前电小天线的电压驻波比曲线图,可知该天线的驻波比变化很大.从图 3 天线的阻抗曲线可知,阻抗的实部在低频端和高频端都很低,即基本上接近于 1 Ω,并且在整个频带上变化非常剧烈,而阻抗虚部相对于实部来说比较大,变化也比较剧烈,这是由电小天线的固有特性决定的.

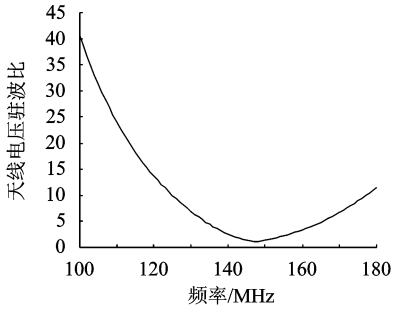


图 2　电小天线电压驻波比曲线

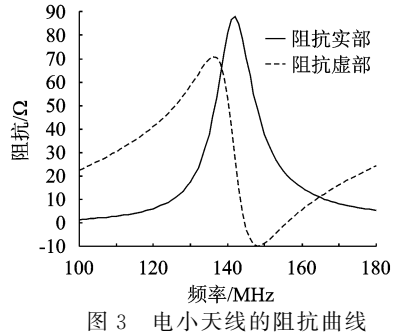


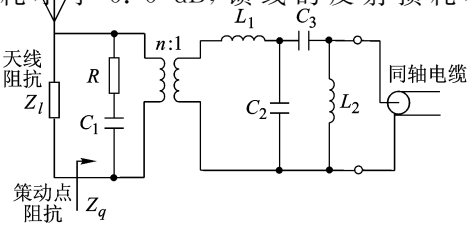
图 3　电小天线的阻抗曲线

2.2　全段匹配

经理论分析,直接通过无耗元件对该天线进行匹配是无法实现的,所以考虑插入附加的阻尼网络,附加网络中的 R,L,C 元件值的选取,可通过优化并结合具体的技术要求而定,目的是改善天线端口的阻抗特性,对天线的阻抗值进行一定的修正,使其易于匹配.

针对电小天线特性,综合考虑其带宽和效率等制约因素,设计出了一种最佳的网络拓扑结构,即在该天线的底部并联一个 R-C 串联网络,当插入该附加网络后,将天线和附加阻尼网络看作一个负载,然后再根据优化算法对该负载进行无耗匹配.最后再结合仿真软件 Ansoft Designer 仿真验证了该匹配网络,达到了预期要求.

图 4 是该天线的宽带匹配等效电路形式.由图 5 可以看出,加入该匹配网络,可以使天线在 100～180 MHz 频带范围内驻波比小于 2.5.图 6 为天线的使用效率计算曲线,可知在通带内天线的使用效率基本上达到了 30%以上(其中网络插入损耗小于 5.5 dB,馈线的反射损耗小于



$R=40\ \Omega, C_1=24.2$ pF, $L_1=11.6$ nH, $n=1.1787$, $C_2=12.7$ pF, $C_3=28.9$ pF, $L_2=71.5$ nH

图 4　宽带匹配等效电路形式

0.9 dB),说明加入匹配网络显著地提高了该电小天线的使用效率,在设计中充分考虑了带宽和天线效率这两个制约因素.

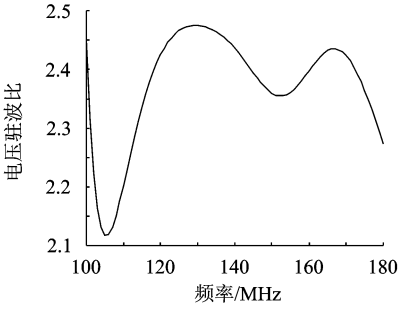


图5 全段匹配后电压驻波比曲线

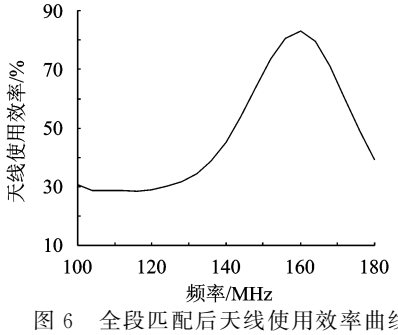


图6 全段匹配后天线使用效率曲线

2.3 分段匹配

由于该天线在通带低频端输入电阻太小,而其电抗过大,使得该天线低频端的效率极低.为进一步提高该天线低端的使用效率和增益,可以考虑采用分段匹配的方法,即分两段:在100～130 MHz和130～180 MHz频段上分别对天线进行匹配.在分段匹配中,采用与图4相同的网络拓扑结构,在两段上分别进行优化设计对应的匹配网络元件值,然后利用高频转换开关,即两个继电器对整个工作频段高速切换控制.图7、图8分别表示进行分段匹配后天线在整个通带内的驻波比曲线和天线使用效率曲线.

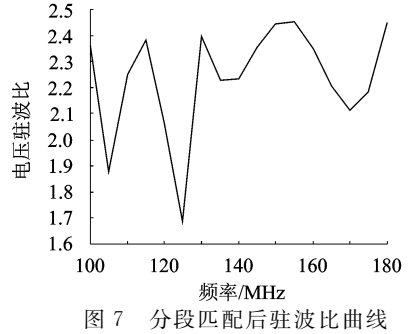


图7 分段匹配后驻波比曲线

由图7、图8可知,天线的使用效率在低频端高于35%并且馈线端的电压驻波比也在2.5以下,得到了非常满意的匹配效果.因此,对电小天线进行分段匹配后可以进一步提高其使用效率,

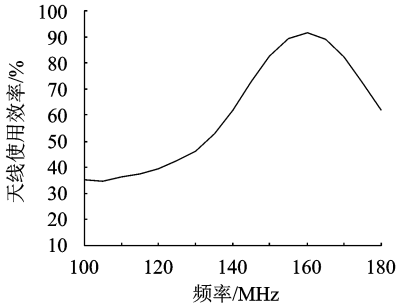


图8 分段匹配后天线使用效率曲线

尤其是其低频端的效率,使得匹配效果更佳.由于分段匹配过程中需针对每一个频段内的天线特性进行匹配设计,每段中设计出的匹配网络拓扑结构也可能不同,具体实现时必须采用一个高频转换开关来实现工作频段的切换,而全段匹配在整个频段内只需设计一个网络拓扑形式,因此,其复杂度也相应的比全段匹配大一些.具体实现时可根据实际需求情况来设计天线宽带匹配网络.

3 结 论

本文提出了一种新型的适合于电小天线匹配的网络拓扑结构,并采用实频数据法和直接优化法相结合的优化方法设计出了电小天线的宽带匹配网络.当仅用无耗元件无法对电小天线进行匹配时,尤其当天线的阻抗实部相对于其虚部很小时的情况.采用该网络拓扑结构来设计电小天线的宽带匹配网络,可以有效地展宽电小天线带宽的同时,大幅度改善该天线的效率.本文所设计的网络拓扑结构很适合该类电小天线的匹配,计算结果也证明了采用这种拓扑结构来匹配电小天线是可行的,它在设计电小天线以及其它天线的宽带匹配网络上具有很大的应用前景.

参考文献(References)

[1] 阮成礼.超宽带天线理论与技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006:59－110
Ruan Chengli. Theory and design of ultra-wide band antenna [M]. Harbin: Press of Harbin University of Technology, 2006: 59－110 (in Chinese)

[2] 文武丰.短波超短波宽带小型化天线及匹配网络研究[D].成都:电子科技大学电子工程学院,2005
Weng Wufeng. Study of HF/VHF broadband and miniature antenna with matching network[D]. Chengdu: School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2005(in Chinese)

(下转第1319页)