

天线调谐器阻抗匹配网络 VSWR 解空间分析

李引凡

(重庆通信学院)

摘 要:对 Γ 形和反 Γ 形匹配网络的 VSWR 解空间进行了分析,求解了 VSWR 极小点的分布,并对局部极小点的特性进行了分析,指出了其邻域的一维属性,同时将分析引申到 Π 形和 T 形匹配网络,为后续调谐算法的设计提供了参考。

关键词:天线调谐器;阻抗匹配网络;电压驻波比

0 引言

阻抗匹配网络是天线调谐器的核心部件,其性能的优劣直接影响天线调谐器的调谐指标。匹配网络的结构、参数及 VSWR 解空间分布对于调谐算法的设计、匹配参数的检测和微机处理的控制有着重要的影响,对其进行分析将为后续的设计工作提供重要的参考。

1 Γ 形匹配网络

1.1 网络概述

C-L 型网络是最常见的 Γ 形网络结构,该网络由输入并联电容 C 和输出串联电感 L 组成,如图 1 所示。

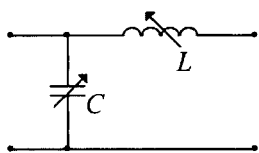


图 1 Γ 形阻抗匹配网络

令天线的输入阻抗为 Z_a ,则经过 Γ 形网络匹配后的输入阻抗 Z_i 为

$$Z_i = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{j\omega L + Z_a}} \quad (1)$$

匹配后的 VSWR 值 σ 为

$$\sigma = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2)$$

式中

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_i - R_g}{Z_i + R_g} \right| \quad (3)$$

显然, $|\Gamma|$ 的取值为 $0 \leq |\Gamma| < 1$, σ 的取值为

$1 \leq \sigma < \infty$, 且 σ 是 $|\Gamma|$ 的单调增函数,为简化计算,可通过分析 $|\Gamma|$ 的分布来反映 σ 的分布。

当网络完全匹配时,有 $Z_i = R_g$ (通常 $R_g = 50\Omega$),对式(1)进行重写可得

$$Z_a = \frac{1}{\frac{1}{R_g} - j\omega C} - j\omega L \quad (4)$$

对式(4)进行整理可得

$$\begin{cases} R_a = \frac{R_g}{1 + (\omega C R_g)^2} \\ X_a = \frac{\omega C R_g^2}{1 + (\omega C R_g)^2} - \omega L \end{cases} \quad (5)$$

理想情况下, L 和 C 的取值为 $0 \sim \infty$, 因此由式(5)可以得到由 L 和 C 组成的 Γ 形网络的匹配区域为

$$X_a \leq \sqrt{R_a(R_g - R_a)} \quad (6)$$

式中, $0 < R_a \leq R_g$ 。

对于匹配区域外的阻抗点,则可通过并联电容 C' (形成 Π 形网络),将其变换到匹配区域内,再由 Γ 形网络进行匹配,因此本文只讨论满足式(6)的情况。

1.2 连续型网络 VSWR 分析

令 $C = 0$,联合式(1)和(3)且令 $\partial |\Gamma| / \partial L = 0$ 可得

$$\omega L = -X_a \quad (7)$$

由式(7)可知,在不考虑 C 时,当且仅当 $X_a \leq 0$ 且 L 取值满足式(7)时, $|\Gamma|$ 取最小值,显然此时 $R_i^{(1)} = R_a$, $X_i^{(1)} = 0$; 当 $X_a > 0$ 时,理论上 $|\Gamma|$ 取最小值时 $L < 0$,与实际情况不符,因此可知此时 $L = 0$ 时 $|\Gamma|$ 取最小值。

联合式(1)和(3)且令 $\partial|\Gamma|/\partial C=0$ 可得

$$\omega C = \frac{X_L}{R_a^2 + X_L^2} \quad (8)$$

式中 $X_L = X_a + \omega L$ 。由式(8)可知,当且仅当 $X_L \geq 0$ 且 C 取值满足式(8)时, $|\Gamma|$ 取最小值,显然此时 $R_i^{(2)} = \frac{R_a^2 + X_L^2}{R_a}$ 、 $X_i^{(2)} = 0$;当 $X_L < 0$ 时,理论上 $|\Gamma|$ 取最小值时 $C < 0$,与实际情况不符,因此可知此时 $C=0$ 时 $|\Gamma|$ 取最小值。

在式(6)的约束下, $R_i^{(1)} \leq R_i^{(2)} \leq R_g$,因此点 $(R_i^{(2)}, 0)$ 具有比点 $(R_i^{(1)}, 0)$ 更小的 $|\Gamma|$ 值,且 $|\Gamma|$ 是 X_L 的单调递减函数,当 $X_L = \sqrt{R_a(R_g - R_a)}$ 时, $R_i^{(2)} = R_g$ 、 $|\Gamma| = 0$,此为全局最小值。同时可知,点 $(R_i^{(1)}, 0)$ 仅是 L 方向和 C 方向上的极小点,而不是满足式(7)和(8)的 (L, C) 邻域内的极小点。

点 $(R_i^{(1)}, 0)$ 和 $(R_g, 0)$ 对应的 L 和 C 的解分别满足下两式

$$\begin{cases} \omega L^{(1)} = -X_a \\ \omega C^{(1)} = 0 \end{cases} \quad (X_a \leq 0) \quad (9)$$

$$\begin{cases} \omega L^{(2)} = \sqrt{R_a(R_g - R_a)} - X_a \\ \omega C^{(2)} = \sqrt{\left(\frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_g}\right) \frac{1}{R_g}} \end{cases} \quad (X_a \leq \sqrt{R_a(R_g - R_a)}) \quad (10)$$

对于式(6)区域外的阻抗点 Z'_a ,可并联电容 C' 形成 Π 形网络,将其变换到式(6)区域内,有

$$Z_a = \frac{1}{j\omega C' + \frac{1}{Z'_a}} \quad (11)$$

显然,由式(6)可知此时有 $X_a < 0$ 。因此,每一个满足式(11)的 C' 均对应两个VSWR局部极小点,且其中一个为全局最小点 $(R_g, 0)$ 。

1.3 离散型网络 VSWR 分析

在天线调谐器中,为了实现匹配网络参数的可变,一般采用二进制的元件阵列来实现,各电抗元件的取值为

$$\begin{cases} L_m = 2^{m-1} L_1 \\ C_n = 2^{n-1} C_1 \end{cases} \quad (12)$$

则 L 和 C 的取值为

$$\begin{cases} L = \sum_{i=1}^m 2^{i-1} L_1 a_i \\ C = \sum_{j=1}^n 2^{j-1} C_1 b_j \end{cases} \quad (13)$$

其中, a_i 和 b_j 取值为“0”或“1”。

当 L 和 C 为离散变量时,VSWR解的分布变得相对复杂,根据步进 ωL_1 和 ωC_1 大小的不同,可能出现以下两种情况:

(1)仅存在一个最小点,位于 $(R_g, 0)$ 附近;

(2)存在两个极小点,分别位于 $(R_g, 0)$ 附近和 $(R_i^{(1)}, 0)$ 附近,且当 ωL_1 和 ωC_1 足够小时,局部极小点位于 $(R_i^{(1)}, X)$,其中 $X \leq 0$ 。

2 反 Γ 形匹配网络

$l-c$ 型反 Γ 形匹配网络由输入串联电感 l 和输出并联电容 c 组成,如图2所示。

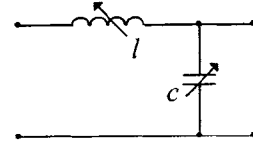


图2 反 Γ 形阻抗匹配网络

参照式(1)和(4)可知反 Γ 形网络输入阻抗为

$$Z_i = \frac{1}{\frac{1}{Z_a} + j\omega c} + j\omega l \quad (14)$$

匹配区域为

$$\begin{cases} X_a \geq \sqrt{R_a(R_g - R_a)} & (R_a \leq R_g) \\ X_a \in (-\infty, +\infty) & (R_a > R_g) \end{cases} \quad (15)$$

对于匹配区域外的阻抗点,则可通过串联电感 l' (形成T形网络),将其变换到匹配区域内,再由反 Γ 形网络进行匹配,在这里只讨论满足式(15)的情况。

令 $l=0$,联合式(3)和(14)且令 $\partial|\Gamma|/\partial c=0$ 可得

$$\omega c = \frac{X_a}{R_a^2 + X_a^2} \quad (16)$$

由式(16)可知,在不考虑 l 时,当且仅当 $X_a \geq 0$ 且 c 取值满足式(16)时, $|\Gamma|$ 取最小值,显然此时 $R_i^{(3)} = \frac{R_a^2 + X_a^2}{R_a}$ 、 $X_i^{(3)} = 0$;当 $X_a < 0$ 时,理论上 $|\Gamma|$ 取最小值时 $c < 0$,与实际情况不符,因此可

知此时 $c=0$ 时 $|\Gamma|$ 取最小值。

联合式(3)和(14)且令 $\partial|\Gamma|/\partial l=0$ 可得

$$\omega l = -X_c \quad (17)$$

式中 $X_c = \text{Im}\left(\frac{1}{j\omega c + 1/Z_a}\right)$ 。

由式(17)可知,当且仅当 $X_c \leq 0$ 且 l 取值满足式(17)时, $|\Gamma|$ 取最小值,显然此时 $R_i^{(4)} = \frac{R_a}{(1 - \omega c X_a)^2 + (\omega c R_a)^2}$, $X_i^{(4)} = 0$; 当 $X_c > 0$ 时,理论上 $|\Gamma|$ 取最小值时 $l < 0$, 与实际情况不符,因此可知此时 $l=0$ 时 $|\Gamma|$ 取最小值。

令 $\partial R_i^{(4)}/\partial c = 0$ 可得式(16),由此可知 $R_i^{(4)} < R_i^{(3)}$, 在式(15)的约束下,点 $(R_i^{(4)}, 0)$ 具有比点 $(R_i^{(3)}, 0)$ 更小的 $|\Gamma|$ 值,且 $|\Gamma|$ 是 c 的单调递减函数,当 $\omega c = \sqrt{\left(\frac{1}{R_g} - \frac{1}{R_i^{(3)}}\right) \frac{1}{R_i^{(3)}}} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_i^{(3)}}\right) \frac{1}{R_i^{(3)}}}$ 时, $R_i^{(4)} = R_g$, $|\Gamma| = 0$, 此为全局最小值。

点 $(R_i^{(3)}, 0)$ 或 $(R_g, 0)$, 其 l 和 c 的解满足下两式

$$\begin{cases} \omega c^{(1)} = \frac{X_a}{R_a^2 + X_a^2} & (X_a \geq 0) \\ \omega l^{(1)} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \omega c^{(2)} = \sqrt{\left(\frac{1}{R_g} - \frac{1}{R_i^{(3)}}\right) \frac{1}{R_i^{(3)}}} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_i^{(3)}}\right) \frac{1}{R_i^{(3)}}} \\ \omega l^{(2)} = \sqrt{R_g(R_i^{(3)} - R_g)} \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中的“ $\pm$ ”,当 $X_a \geq 0$ 时取正,当 $X_a < 0$ 时取负。

对于离散型网络,反 Γ 形网络具有与 1.3 相同的情况,分析方法类似,在此不再赘述。

3 结束语

以上对连续/离散型 Γ 形/反 Γ 形阻抗匹配网络的 VSWR 解空间进行了分析,得出了其局部

极小点和全局最小点所在的位置。根据局部极小点所具备的特性,可指导设计调谐算法时,通过合理的坐标搜索顺序和邻域步长设置,使算法跳出局部极小点,最终收敛到全局最小点。

参考文献

- [1] SJ-20489-1995, 中华人民共和国电子行业军用标准——天线调谐器通用规范[S], 1995.
- [2] 胡中豫. 现代短波通信[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 179-182.
- [3] Thompson M, Fidler J K. Determination of the Impedance Matching Domain of Impedance Matching Networks [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Regular Papers, Vol. 51, No. 10, October 2004. 2098-2106.
- [4] Sun Y C, Fidler J K. Component Value Ranges of Tunable Impedance Matching Networks in RF Communications Systems [J]. HF Radio Systems and Techniques, 7-10 July 1997. 185-189.
- [5] Sun Y C, Lau W K. Antenna Impedance Matching using Genetic Algorithms[C]. National Conference on Antennas and Propagation; 30 March-1 April 1999. 31-36.
- [6] Brito de Brito K, Nunes de Lima R. Impedance Network for an Automatic Impedance Matching System [C]. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2007. 1-4.
- [7] Mileusnic M, Petrovic P, Todorovic J. Design and Implementation of Fast Antenna Tuner for HF Systems [C]. International Conference on Information, Communications and Signal Processing ICICS'97 Singapore, 9-12 September 1997. 1722-1726.
- [8] Oh Sung-Hoon. Automatically Tuning Antenna System for Software-Defined and Cognitive Radio [D]. Arizona State University, May 2006. 88-96.

作者: 李引凡, 重庆通信学院军事信息工程系讲师。

地址: 重庆通信学院无线电通信装备教研室(400035)

电话: 13018303807

邮箱: lyfcqcc@sina.com

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>