

电小天线传输线补偿电路的优化设计

王 琪,阮成礼,王洪裕
(电子科技大学物理电子学院,四川成都 610054)

摘 要: 本文研究一种电小天线的新型补偿电路,即用短路传输线与天线相并联的方式实现对电小天线的宽带匹配.给出了在满足电压驻波比的前提下,以提高天线效率为准则的优化设计方案.在将天线、补偿电路以及馈电线作为一个整体,从而计算出阻抗、驻波比、效率、增益等参数的基础上,对电路的补偿能力进行了详细的讨论.整个分析过程不涉及具体天线的结构,因而是研究电小天线补偿电路的一般方法.

关键词: 电小天线; 补偿电路; 短路传输线; 宽带匹配; 数值计算; 优化设计

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-1020-03

Optimizing Design for the Compensation Circuit of Electrically Small Antennas with Short-Circuited Transmission Line

WANG Qi, RUAN Cheng-li, WANG Hong-yu
(College of Physical Electronics, UEST of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: A novel compensation circuit of electrically small antennas is presented, in which a short-circuited transmission line shunted with the antenna is used to realize the broadband matching. Optimizing design scheme is obtained in the premise of ensuring the given VSWR and improving efficiency. The compensation ability of the circuit is discussed in detail by calculating numerically parameters of the whole circuit such as impedance, VSWR, efficiency and gain etc.. This is a general design method for optimizing an electrically small antenna because it does not deal with concrete configuration of antennas.

Key words: electrically small antenna; compensation circuit; short-circuited transmission line; broadband matching; numerical calculating; optimistic design

1 引言

电小天线一般是指 $ka < 1$ 的天线^[1],其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, a 为天线的一维最大线长度.电小天线的主要特点是 ka 越小,辐射电阻越小,电抗越大,大部分能量储存在天线周围难以辐射出去.因此,电小天线如果与馈线直接相连会因电压驻波比过大而不能应用于工程.减小 VSWR 的主要方法之一是运用加载技术,通过电感、电阻或其组合对电容性天线进行加载,以获得符合要求的 VSWR.通过加载技术实现天线补偿的研究已有多年,并有相当的成果^[2].近年来随着天线朝着小型化和宽带化方向发展,加载技术研究更加重要,范围更加开阔.本文介绍一种与天线相并联的补偿电路,补偿电路用短路传输线与电阻相串联而成,实质是构成了电小天线的匹配负载.这种电路结构的优点在于:(1)巧妙地利用了短路传输线的电感特性,使之更有效地实现对容性负载的补偿;(2)运用成熟的传输线理论更容易实现补偿电路各项参数的设计和计算;(3)补偿电路加工简单,容易实现小型化和隐蔽封装.文中介绍了并联短路传输线加载电路的设计思想和参数的确定准

则,并将该理论应用到平板型单极子天线的设计与分析.通过将补偿后的天线与源和馈线作为一个整体进行研究,计算了整个传输系统的输入阻抗、电压驻波比、效率、增益与频率的变化关系,并对电路的补偿能力进行了详细讨论.理论计算与实验值进行了比较,得到很好的一致,表明了分析方法的正确性.

2 并联传输线补偿电路理论分析

图1表示了电小偶极型天线的等效电路和补偿电路. z_1 和 r_1 代表天线的等效部分,其中 r_1 是天线的辐射电阻,阻值在电小范围一般随频率增大而单调增加. x_1 代表电小天线输入电抗(容抗)值,在电小范围内一般随频率增大而单调减小.两者随频率的变化规律视具体天线结构而定,在很多情况下可由数值方法求得或由实验给出. z_2 和 r_2 代表补偿电路部分,其中 r_2 是一个待定的固定电阻, x_2 为待定短路传输线的电抗(感抗)值.

根据传输线理论,短路传输线的输入阻抗

$$z_2 = jx_2 = jz_0 \operatorname{tg} kl \quad (1)$$

其中 z_0 代表补偿电路传输线本身的特征阻抗,其值由传输线的具体结构和尺寸所决定。 k 为波数, l 为短路传输线长度。从定性角度分析,在工作频率范围内的低

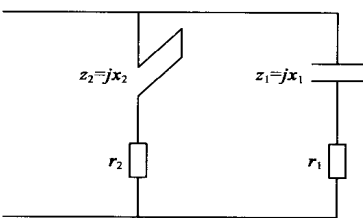


图 1 电小天线等效电路及补偿电路

消除天线的大容抗,在高端则应部分去除补偿电路对天线辐射能力的影响。短路传输线恰恰具有这样的特点:在一定频率范围,随频率增大, x_2 单调增加,这与 x_1 的单调减小起着一定的抵偿作用。

现在用同轴线对包含补偿电路在内的整个电小天线系统进行馈电。设同轴线的特征阻抗为 z_c ,则可以计算与馈线相连接电路的阻抗、效率、电压驻波比和增益,进而研究补偿电路各参数的优化设计。

加入补偿电路后,天线总的输入阻抗为

$$Z_{in} = \frac{(r_1 - jx_1)(r_2 + jx_2)}{(r_1 + r_2) + j(x_2 - x_1)} \quad (2)$$

实部

$$r_{in} = \frac{r_1(r_2^2 + x_2^2) + r_2(r_1^2 + x_1^2)}{(r_1 + r_2)^2 + (x_2 - x_1)^2} \quad (3)$$

虚部

$$x_{in} = \frac{x_2(r_1^2 + x_1^2) - x_1(r_2^2 + x_2^2)}{(r_1 + r_2)^2 + (x_2 - x_1)^2} \quad (4)$$

电压驻波比

$$VSWR = \frac{1 + |v|}{1 - |v|} \quad (5)$$

其中反射系数

$$|v| = \left| \frac{z_{in} - z_c}{z_{in} + z_c} \right| = \frac{\sqrt{x_{in}^2 + (r_{in} - z_c)^2}}{\sqrt{x_{in}^2 + (r_{in} + z_c)^2}} \quad (6)$$

设 P_{r1} 为天线的辐射功率, P_{r2} 为电阻 r_2 上的耗散功率,不考虑天线自身的损耗,则天线的效率为

$$\eta = \frac{P_{r1}}{P_{r1} + P_{r2}} = \frac{1}{1 + \frac{r_2(r_1^2 + x_1^2)}{r_1(r_2^2 + x_2^2)}} \quad (7)$$

电小偶极天线的方向性系数在全频段内近似为

$$D = 1.5 \quad (8)$$

对有接地板存在的单极子,方向性系数加倍^[3]

$$D = 3 \quad (9)$$

整个天线系统的总的增益应同时考虑天线效率(包括补偿电路)和与馈电系统的配谐损耗,故有^[4]

$$G = (1 - |v|^2) D \quad (10)$$

设天线工作频带的下限和上限分别为 f_1 和 f_2 ,相应的真空中波长为 λ_1 和 λ_2 ,短路传输线的长度应根据最高工作频率来确定,应满足:

$$kl < \lambda/2 \text{ 或 } l < \lambda/4 \quad (11)$$

直接取 $l = \lambda/4$ 一般并不合适,这因正切函数 tg 在趋近于 $\lambda/2$ 时急剧增加直至无穷大,此时总输入阻抗 Z_{in} 实际由天线自身阻抗 $r_1 + jx_1$ 所决定,即 r_2 和 x_2 已不再起到补偿作用。因此, l 的选取可表示成

$$l = b / 4 \quad (12)$$

其中系数 $b < 1$ 可根据天线阻抗曲线具体形状选定在接近 1 的范围。

当天线工作在 f_1 附近时,一般有 x_1 远大于 r_1 、 r_2 和 x_2 ,由式(3)和式(4)有

$$r_{in} \approx r_2, \quad x_{in} \approx x_2 = z_0 \text{tg}(2l / \lambda) \quad (13)$$

设 VSWR0 为天线在工作范围内所允许的最大驻波比,相应的最大允许反射系数为 $|v_0|$ 。又设在最低工作频率 f_1 时天线反射系数为 $|v_1|$,且 $0 < |v_1| < |v_0|$ 。

由式(6)和式(13),当 $f = f_1$ 时,要求 $|v_1| < |v_0|$,故

$$z_0 \text{ctg}\left(\frac{2l}{\lambda}\right) \leq \frac{\sqrt{\frac{2z_c(r_2 + z_c)^2 - (r_2 - z_c)^2}{1 - |v_1|^2}}}{|v_1|} \quad (14)$$

此为满足驻波要求的必要条件。

在频点 f_1 附近,由式(7)可知, r_2 和 x_2 的增加都有利于效率的提高。所以,在式(14)中取使 z_0 为最大值时的 r_2 是最为恰当的,由极值关系容易求出

$$r_2 = z_c \frac{1 + |v_1|^2}{1 - |v_1|^2} \quad (15)$$

代入式(14),得最大的 z_0 为

$$z_0 = \frac{2z_c |v_1|}{1 - |v_1|^2} \text{ctg}(2l / \lambda) \quad (16)$$

$|v_1|$ 的选择取决于天线自身的阻抗特性 $r_1(f)$ 和 $x_1(f)$ 。如果 $f_1 \sim f_2$ 范围选取过大,有可能在整个频带范围内,对任意 $0 < |v_1| < |v_0|$,都不能满足 $0 < |v_1| < |v_0|$,这表明短路传输线补偿的范围是有限的。

一般电小天线的阻抗曲线可借助数值方法或仿真技术求得。如果 VSWR0 及 f_1 和 f_2 均已设定,则 $|v_1|$ 选取原则是:在满足驻波要求的前提下,尽可能选取大的 $|v_1|$,以达到增加 r_2 和 x_2 值,从而提高效率的目的。具体做法是:从大到小选取若干 $|v_1|$ 值,分别求得补偿参数 r_2 和 z_0 ,再代入式(3)~(5)求 $|v_1|$ 。如果对某一选择的 $|v_1|$,刚好使得在所有频点上均满足 $0 < |v_1| < |v_0|$,则该 $|v_1|$ 对应的 r_2 和 z_0 就是所需要的优化参数。如果不存在这样的选择,表明 f_2 选取过大,超过了传输线可补偿范围。

3 应用实例

平面三角单极子天线的一种演化形式如图 2 所示。出于工程需要,该缩比模型高度 $h = 0.3\text{m}$,宽度 $d = 0.1\text{m}$,厚度 $t = 0.003\text{m}$,半锥角 $\theta = 40^\circ$ 。取 VSWR0 = 2.5, $z_c = 50 \Omega$,工作频率范围为 20MHz ~ 150MHz,对应于 $kh = 0.126 \sim 0.942$,这是典型的电小天线问题。

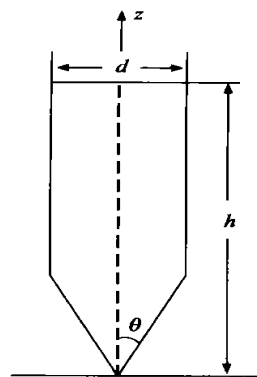


图 2 平面三角变形单极子天线

首先用数值方法^[5]计算无加载电路天线的输入阻抗 $r_1(f)$ 和 $x_1(f)$,同时计算天线的总输入阻抗、电压

驻波比、效率和总增益随频率的变化关系,结果如图 3 所示.再根据以上计算,求得补偿电路优化参数为: $l = 0.47\text{m}$, $r_2 = 50$, $z_0 = 74$, $b = 0.94$. 短路传输线用带线来实现,并将其封闭在双层印刷板的介质层之间.图 4 绘制了这种单极子天线在引入优化补偿电路后计算得的天线参数的频率响应关系(实线),同时绘制了仅用纯电阻 $r_2 = 50$ 作为补偿电路时天线参数的频变关系(虚线).

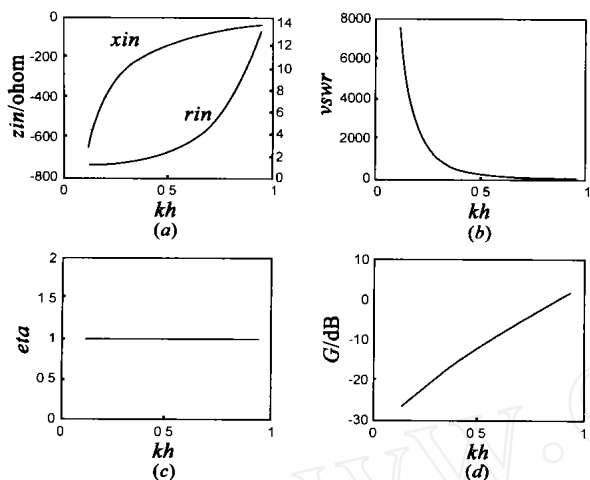


图 3 无补偿电路 (a) 阻抗, (b) 驻波比, (c) 效率, (d) 增益与归一化频率 kh 的关系

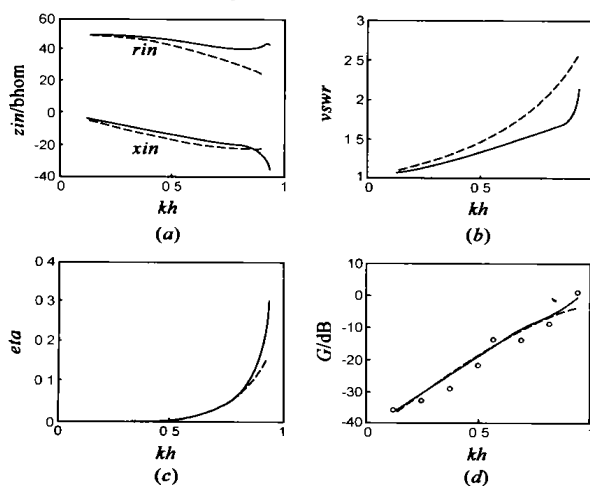


图 4 加入电阻补偿电路(虚线)和优化补偿电路(实线)后 (a) 阻抗, (b) 驻波比, (c) 效率, (d) 增益与归一化频率 kh 的关系, (圆圈为实验值)

通过比较分析,得到以下结论:(1)由图 3 各条曲线可知,对不作任何加载的天线,尽管天线的效率高(这里没有考虑天线自身的欧姆损耗),但驻波比很大,总的增益也很低,不能应用于工程;(2)从图 4(b)的驻波比曲线比较可知,优化补偿电路较之纯电阻补偿电路十分有效地降低了 $VSWR$ 的值,拓展了频带宽度,体现出短路传输线的补偿效应;(3)从图 4(c)的效率曲线比较可知,频率的展宽是以效率的下降为代价的,补

偿电路的欧姆损耗大大降低了天线的效率,但优化的补偿电路改善了纯电阻补偿电路的效率,这在高频段比较明显;(4)从图 4(d)的增益曲线比较可知,偶极型电小天线的增益是非常低的,补偿电路的引入进一步降低了增益,这在低频端特别明显,但优化电路在一定程度上改善了纯电阻加载补偿电路的增益.图 4 中同时给出了引入优化补偿电路后总增益随频率变化的测试曲线,测试结果与计算结果的基本一致性表明了短路传输线补偿电路的理论分析是可行的.

4 结论

短路传输线补偿电路具有补偿效率高、结构简单、工程实现容易等诸多优点,通过理论分析,得到补偿电路参数的优化方案,编制了计算补偿电路参数的通用程序.实验证实了理论分析的正确性.理论分析不涉及特定的偶极天线,因而是分析一般偶极型天线的普遍方法.鉴于在引入补偿电路后效率偏低的问题,我们拟采用磁偶极子型补偿电路以增加天线的辐射能力,这方面的工作正在作进一步的深入研究.

参考文献:

- [1] H A Wheeler. Fundamental limitations of small antennas[J]. Proceedings of the IRE, 1947, 12(35): 1479 - 1484.
- [2] A K Skriverik, J F Zücher, O Staub, J R Mösig. PCS antenna design: the challenge of miniaturization[J]. IEEE Tran On AP, 2001, 4(43): 12 - 27.
- [3] W L Stuzman, G A Thiele. Antenna Theory and Design[M]. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2th ed, 1998, 67 - 68.
- [4] K Fujimoto, et al. Small Antenna[M]. USA: John Wilcy & Sons, Inc. 1987. 3 - 5.
- [5] HFSS and Optimetrics[Z]. version 8. 0. 2001, (Ansoft Corp, USA)

作者简介:



王 琪 男, 1956 年 6 月生于江苏, 现为江苏省盐城师范学院副教授、电子科技大学博士研究生, 电磁场与微波技术专业, 主要研究方向为电小天线的宽频带特性, 电磁场数值计算等.



阮成礼 男, 1944 年 5 月生于湖北, 1981 年于成都电讯工程学院获电磁场微波技术学科工学硕士学位, 1984 年于电子科技大学电磁场微波技术学科获工学博士学位, 现为电子科技大学教授、博士生导师, 中国电子学会, 中国电工学会, IEEE 会员, 研究领域包括: 电磁场微波技术, 毫米波理论与技术, 超宽带电磁学, 天线, 微波毫米波测量, 光电子技术等.