

介质加载谐振腔滤波器的频率温度系数

柳光福 刘启明

(上海埃德电磁技术有限公司, 上海 200237)

摘要: 本文引用移动通信基站双工器频率温度系数 (FTC) 的测量方法和得到的实验数据, 来指导设计介质加载谐振腔滤波器 (本文以下称为介质谐振腔滤波器), 主要包括介质材料的选择和微调机构的设计。按此方法设计的介质滤波器的频率温度系数能满足下一代移动通信、ITFS、MMDS 和其它相对带宽极窄应用场合的要求。

关键词: 频率温度系数, 介质材料, 介质谐振腔, 介质谐振腔滤波器, 微调机构

Frequency Temperature Coefficient of Dielectric Loaded Cavity Filter

Liu, Guang-fu and Liu, Qi-ming

(AERODEV Electromagnetic Tech Inc., Shanghai 200237, China)

Abstract: The measuring method and test results of frequency temperature coefficient (FTC) of diplexers serving in base station of mobile communication systems are cited and adopted in order to study FTC of dielectric loaded cavity filter. If properly selecting dielectric material's FTC and well designing the trimming outfit, FTC of dielectric loaded cavity filter is able to meet the requirements of the next generation mobile communication systems, ITFS, MMDS and others' which have the smaller relative narrow passband and strict FTC.

Key words: Frequency temperature coefficient (FTC), Dielectric material, Dielectric loaded resonator, Dielectric loaded cavity filter, trimming outfit

1 概述

移动通信技术受到世界各国的重视, 得到迅猛的发展和广泛的应用。在很短的时间内, 我国的移动电话用户就跃居世界之首, 使我国通信信息产业的发展取得了举世瞩目的成就。

我国目前营运的 G 网 (GSM 体制) 和 C 网 (CDMA 体制) 移动通信是属于第二代或二代半的技术和设备, 主要是实现话音通信, 传输速率低, 信息量小。现在, 第三代移动通信的技术已经成熟, 正在酝酿实际应用。我国具有自主知识产权的 TD-SCDMA 制式的第三代移动通信技术和设备已发展到实用水平, 与国外的 WCDMA 和 cdma 制式的技术和设备处于相同的竞技状态, 在不久的将来进入我们的生活。

另一方面, 不管现行移动通信用的是 G 网还是 C 网, 也无论第三代移动通信中是频分体制 (如 WCDMA), 还是时分体制 (如 TD-SCDMA), 都会用双工器与天线的搭配来同时实现通信信号的发送和接收, 双工器在移动通信系统中扮演着十分重要的角色。实际上, 双工器就是把接收滤波器和发射滤波器适当地组合在一起, 它们的频率温度特性直接关系到系统的稳定和通信质量。

由于多种原因, 特别是控制成本的原因, 双工器几乎都是用铝材料加工成型和镀银的工艺来制造。但是, 铝材料的热膨胀系数比铜和钢都大, 这就存在一个问题, 双工器 (即滤波器)

的特性（含传输、阻抗和相位特性等）会随温度变化出现较大的偏移，也就是滤波器的频率温度特性欠佳，在设计时要给以适当的补偿，才能满足实际使用的要求。FTC 能定量的表示滤波器的上述特性，在参考文献 [1] 中，提出了两种 FTC 的描述方法，第一种由 ξ 表示的绝对频率偏移（Hz/°C），即

$$\text{频率温度系数} = \frac{(F_2 - F_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (1)$$

在 (1) 式中：

F_1 (Hz) 是在温度为 T_1 (°C) 时，测得滤波器某特定频率点（如滤波器的传输极点）的频率数值；

F_2 (Hz) 是当温度变为 T_2 (°C) 时，测得滤波器上述特定频率点偏移后的频率数值。

第二种由 η 表示的相对频率偏移（ppm/°C），即

$$\text{频率温度系数} = \frac{2(F_2 - F_1) / (F_1 + F_2)}{(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

参考文献 [1] 中，详细介绍了在实验室测量 900MHz 和 1800MHz GSM 移动基站双工器的 FTC，得到一些很有意义的结果：例如当用铝材料和镀银工艺来制作微波滤波器时，它们的频率温度系数 ξ 和 η 都是负的。即当温度升高时，它们的频率响应曲线会往低频率方向偏移；反之，当温度下降时，它们的频率响应曲线会往高频率方向偏移。

在参考文献 [1] 中，给出了两种实用的频率随温度变化的设计方法。其一为用 (3) 式来估算在给定温度变化范围内的频率偏移 $W_{\text{偏移}}$ ，即

$$W_{\text{偏移}} = \text{频率温度系数} \xi (T_{\text{高}} - T_{\text{低}}) \quad (3)$$

(3) 式中的 $T_{\text{高}}$ 是滤波器的最高工作温度， $T_{\text{低}}$ 是最低工作温度。在设计滤波器的带宽时，其额定带宽要加上 $W_{\text{偏移}}$ ，以保证滤波器的带宽不会因工作温度的变化而发生不满足系统要求情况的发生。其二为在用铝工艺制造滤波器的腔体时，谐振腔的内导体用材料钛来制作，用钢材料作调谐螺钉，选用不同材料的不同线膨胀系数来控制 FTC，使之为最小，以此来控制滤波器的温度偏移。但是，由于钛和钢材料的引入，会恶化双工器和滤波器的互调失真（详见参考文献 [1]），这个方法的应用受到限制。

在某些应用场合，会遇到对 FTC 要求十分严格的情况，如 MMDS 和 IFDS 系统中的信道滤波器、下一代移动通信的双工器和滤波器，以及某些特殊场合的双工器和滤波器。其中，ITFS 和 MMDS 的信道滤波器的频率分配如表 1 和表 2 所示。它们分配的频率在 2.5-2.7GHz 之间，每个信道滤波器的最小带宽只有 5MHz，相对带宽很窄，小于千分之二。每个信道之间的保护带宽只有零点几兆赫兹。如按参考文献 [1] 所述的铝材料和镀银工艺设计制造的这种滤波器，每摄氏度有 10-20 千赫兹的频率偏移，那末，在工作环境温度范围（0 - 60°C）内，滤波器的通带早已偏移到临近频道上，系统根本无法运行。为此，这种滤波器可以用温度稳定性好的介质谐振腔滤波器来实现。下面，我们讨论如何设计和控制介质谐振腔滤波器的 FTC。

表 1 ITFS 信道滤波器的频率分配表

ITFS 信道编号	中心频率 (MHz)	ITFS 信道编号	中心频率 (MHz)
A1	2503	A1 + 0.25	2503.25
B1	2509	B1 + 0.25	2509.25
A2	2515	A2 + 0.25	2515.25
B2	2521	B2 + 0.25	2521.25
A3	2527	A3 + 0.25	2527.25
B3	2533	B3 + 0.25	2533.25
A4	2539	A4 + 0.25	2539.25
B4	2545	B4 + 0.25	2545.25
C1	2551	C1 + 0.25	2551.25
D1	2557	D1 + 0.25	2557.25
C2	2563	C2 + 0.25	2563.25
D2	2569	D2 + 0.25	2569.25
C3	2575	C3 + 0.25	2575.25
D3	2581	D3 + 0.25	2581.25
C4	2587	C4 + 0.25	2587.25
D4	2593	D4 + 0.25	2593.25

表 2 MMDS 信道滤波器的频率分配表

MMDS 信道编号	中心频率 (MHz)	MMDS 信道编号	中心频率 (MHz)
E1	2599	E1 + 0.25	2599.25
F1	2605	F1 + 0.25	2605.25
E2	2611	E2 + 0.25	2611.25
F2	2617	F2 + 0.25	2617.25
E3	2623	E3 + 0.25	2623.25
F3	2629	F3 + 0.25	2629.25
E4	2635	E4 + 0.25	2635.25
F4	2641	F4 + 0.25	2641.25
G1	2647	G1 + 0.25	2647.25
H1	2653	H1 + 0.25	2653.25
G2	2659	G2 + 0.25	2659.25
H2	2665	H2 + 0.25	2665.25
G3	2671	G3 + 0.25	2671.25
H3	2677	H3 + 0.25	2677.25
G4	2683	G4 + 0.25	2683.25
H4	2689	H4 + 0.25	2689.25
		F1 + 1.25	2606.25

2 介质谐振腔滤波器 FTC 的设计考虑

在参考文献 [1] 中,详细讨论了介质谐振腔滤波器的设计。由于介质谐振腔具有无载 Q 很高的特点,很适合于制造 MMDS 和 IFDS 系统中的信道滤波器、下一代移动通讯系统中的双工器和滤波器,及其它特殊用途的滤波器,因为这些带通滤波器的相对带宽都很窄。

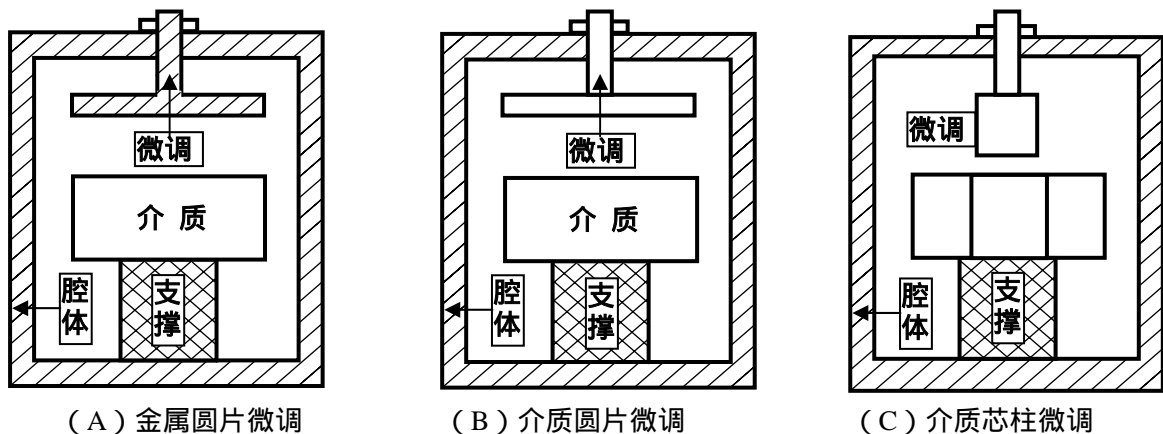


图 1 介质谐振腔的内部结构和微调机构

当然,介质谐振腔滤波器也有频率随温度变化而偏移的特性,同样可以用上述(1)和(2)式来估算它们的 FTC。要控制介质谐振腔滤波器和由介质谐振腔滤波器做成的双工器的 FTC,

必须从控制介质谐振腔的 FTC 入手。图 1 示出了最常用的三种介质谐振腔结构简图。其中的介质材料是与支撑材料粘接在一起，置于金属腔体的中央，这个支撑材料必须是低损耗的、线膨胀系数小的、相对介电常数低的高强度绝缘材料，如氧化铝等。

在参考文献 中述及的、用铝工艺制造的双工器，由于受到通信系统互调失真的约束，其发射和接收滤波器的谐振腔不允许用两种以上的材料来制造。在这样的条件下来控制 FTC 是十分困难的。对介质谐振腔而言，情况就大有改观。首先，当介电常数为 27 以上时，介质谐振腔 TE_{01} 的谐振频率由介质材料的尺寸来决定。当介电常数小于 27，虽然不完全由介质材料的尺寸来决定，但是，它仍是起主导作用的因数。由于每一种介电常数的材料，都能做成不同的 FTC（有正、负以致零 FTC）可供选择。我们可以通过估算和实验来选用合适 FTC 的材料，达到控制介质谐振腔频率温度特性的目的。如某著名大公司 KM 系列的介质材料的部分特性如表 3 所示。

表 3 某介质材料的特性参数

产品特性编码	介电常数	频率温度系数 (ppm/)	7GHz 的最小 Q 值
00	38.5 ± 1.0	0	7400
20	38.7 ± 1.0	± 2	7200
40	38.9 ± 1.0	± 4	7100
60	39.2 ± 1.0	± 6	7000

一方面，采用严格的配方、特殊复杂的工艺，是可以制造出零 ppm/ 的介质材料的，当然价格昂贵，一般来讲，FTC 越小，价格就越贵。另一方面，盲目选用 FTC 小的介质材料，对降低滤波器和双工器的成本极为不利，实践证明也无此必要。只要我们深入分析，从实践中总结经验，完全可以用 FTC 较差的介质材料，做出频率温度特性很好的滤波器和双工器。

在参考文献 中述及，用铝工艺所做的同轴谐振腔的双工器和滤波器的 FTC 为负，当图 1 中的腔体用铝或用其它金属材料来制造时，其腔体的 FTC 仍为负，作为补偿，谐振腔内的介质材料应选具有正 FTC 的，才能控制介质谐振腔滤波器和双工器 FTC，满足某些苛刻的要求。

在图 1 示出了最常用的三种介质载谐振腔结构简图中，我们还要关注有关的微调机构，因为微调机构的设计也能控制滤波器的 FTC。图 1 (A) 中的微调是用金属圆片来实现的，它的特点是微调频率范围小，当金属圆片接近介质材料时要产生大的涡流，引起介质加载谐振腔的 Q 值下降，损耗要增大；图 1 (B) 中的微调是用同一种材料的介质圆片来实现，其特点是微调频率范围大，但是，介质到微调圆片的距离与微调频率间是非线性关系，特别是当介质圆片与介质的距离十分接近时，频率变化剧烈，控制难度大，实现温度补偿较为困难；图 1 (C) 中的微调是用同一种材料的介质芯柱来实现，它能实现的微调范围大，介质芯柱到介质的距离与微调频率间基本上是线性关系，是实现温度补偿较为容易的一种结构。结合所用的介质材料的 FTC，选用合适线膨胀系数的金属或塑料来制作微调机构中与介质材料连接的螺杆，可以从另一侧面来补偿滤波器和双工器 FTC，有可能采用廉价的、FTC 较大的介质材料制作出较理想的滤波器和双工器。

图 1 仅示出介质谐振腔的原理。实际应用中，要设法使介质材料的安装和微调机构可靠，实现既方便生产，又便于调整。

3 介质谐振腔滤波器 FTC 的实验

为了开展介质谐振腔滤波器 FTC 的研究，曾设计加工了由四介质谐振腔组成的、有非临近耦合的介质谐振腔滤波器，图 2 是它的照片。其腔体用铝材加工，表面镀银。照片中的圆环是介质材料，实验中所用介质材料的介电常数约为 36-40，它们的支撑材料是高强度、低损耗的瓷柱，微调机构采用图 1 (A) 的金属圆片。

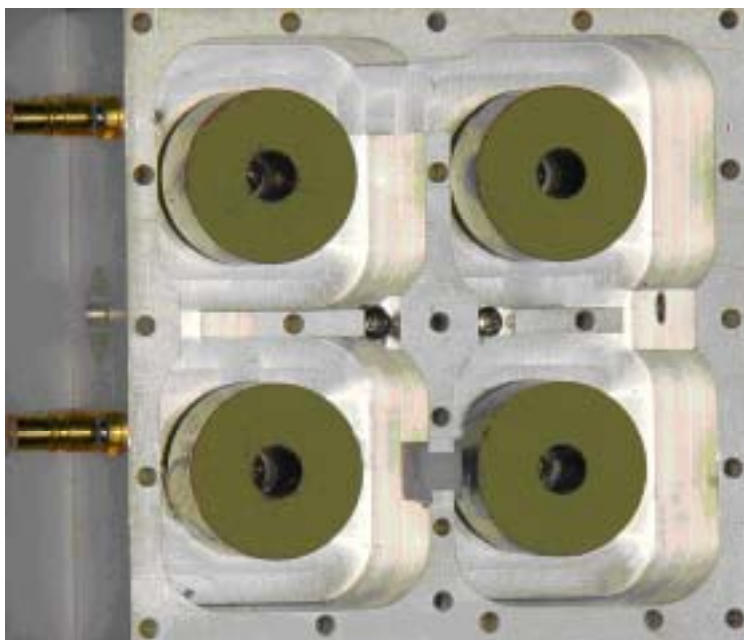


图 2 用作实验的介质谐振腔滤波器的照片

把介质谐振腔滤波器安装调整后，按照参考文献 介绍的 FTC 测试方法，测出不同编号介质材料的滤波器的 FTC，表 4 列出部分数据。

材料 编号	中心频率 f_0 (MHz)	带宽 (MHz)	70 测试 点 f_1 (MHz)	70 测试 点 f_7 (MHz)	温升 ()	总漂 移量 (f_1-f_7)	频率温度 系数 (kHz/)
1	$f_0=2710.25$	6	2703.775	2702.725	60	1050	-17.5
2	$f_0=2772.5$	12	2764.5	2763.8	60	700	-11.66
3	$f_0=2705.8$	8	2700.362	2699.873	60	489	-8.15
4	$f_0=2673.55$	8	2667.202	2666.935	60	267	-4.45

从表 4 可以看出，材料编号为 4 的材料与腔体的组合较好，介质谐振腔滤波器的频率温度系数为 -4.45kHz/。与参考文献 的实验数据比较，进行推理和判断，可以肯定：介质材料编号为 1 的频率温度系数 应该是负 FTC，因为这些数值比参考文献 中用铝工艺制造的双工器的频率温度系数 还要负很多，这是没能正确选用了介质材料的 FTC 所致。从参考文献 的实验数据知道，1800MHz GSM 铝工艺双工器的频率温度系数 -12.5kHz/，要控制介质谐振腔滤波器的 FTC，必须选用正 FTC 的介质材料才能达此目的。由于在研究这种滤波器频率温度特性的过程中，受多种条件限制，我们没有能力测试出每一种介质材料的 FTC。

4 一个实例

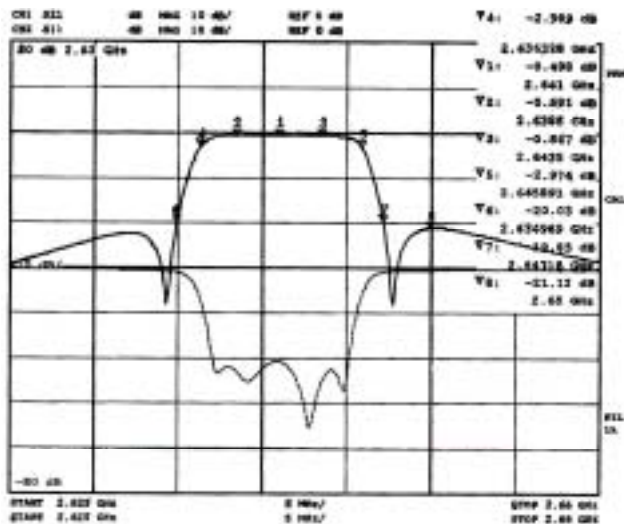


图3 零参考滤波器的输出曲线

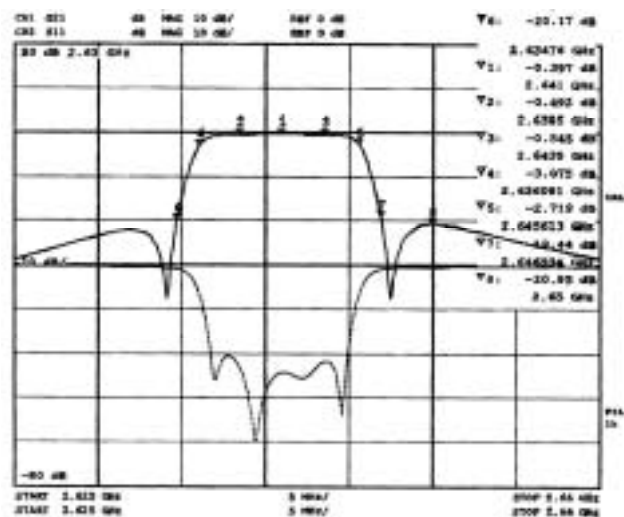


图4 60度滤波器的输出曲线

在研究介质谐振腔滤波器的 FTC 实践中，我们不断总结经验，得到了可喜的结果。其中一个实验滤波器去掉上盖板后腔体内的实际情况如图 2 的照片所示。图 2 中四个谐振腔体的尺寸为 43(宽) × 43(长) × 30(深)立方毫米；介质材料的介电常数约为 38，它的尺寸为 21(外径) × 7(内径) × 8(厚)立方毫米；使用的微调机构如图 1(B)所示，其中微调介质圆盘的具体尺寸为 19(外径) × 7(内径) × 1.5(厚)立方毫米。特殊的地方在于，微调杆是由黄铜做成，用尼龙朔料做成螺钉，把用于微调的介质圆盘与微调机构做成一体，既便于微调，又牢固、可靠。这个滤波器的中心频率为 2641MHz，3dB 带宽为 9.56MHz，相对带宽为千分之 3.62。图 3 为在 R/S 公司的网络分析仪上测得 0 的频率响应曲线，图 4 为测得 60 的频率响应曲线，用参考文献 [1] 中介绍的方法，测得这只介质谐振腔滤波器上边带的 FTC 为： $\text{FTC}_{\text{上}} = -3.8\text{kHz/}$ 和 $\text{FTC}_{\text{上}} = -1.435\text{ppm/}$ ，测得下边带的 FTC 为： $\text{FTC}_{\text{下}} = -3.5\text{kHz/}$ 和 $\text{FTC}_{\text{下}} = -1.328\text{ppm/}$ 。关于上边带和下边带 FTC 不同的分析，见参考文献 [2]。

5 结论

用在下一代移动通信、IFTS、MMDS 和某些电子系统中的滤波器和双工器要面对这样的现

实，既要求微波滤波器的带宽很窄，又要求滤波器能满足苛刻的 FTC。这时候，用介质谐振腔滤波器来实现它们是一种恰当的选择。首先，介质谐振腔的无载 Q 值很高，由它做成的介质谐振腔滤波器体积小，插入损耗低，选择性能好；其次，可以通过选用低成本的、正频率温度系数的介质材料，采用有补偿作用的微调机构等办法来实现滤波器的 FTC，既可降低这些滤波器的成本，又能满足某些频率温度特性要求十分苛刻的场合。文中论及微调机构温度特性的分析和控制 FTC 实际例子的介绍，对设计这类滤波器有可供借鉴之处。

6 感谢

本研究得到上海市科技发展基金的资助，项目编号为 025211099。

参考文献

- 柳光福 刘启明，“双工器的频率温度系数”，《航空电子技术》，2006 年第 37 卷第 1 期；
柳光福 刘启明 沈仁年，“EGSM 900MHz 移动通讯基站天线模块中互调失真的测量与控制”，《航空电子技术》，2007 年第 38 卷第 1 期；
柳光福 刘启明 葛光楣，“介质谐振腔滤波器”，《航空电子技术》，2004 年第 35 卷第 1 期；
Joseph M Chuma and Dariush Mirshekar-Syahkal. Compact Dielectric Loaded Combline Filter with Low Insertion-loss[C]. 30th European Microwave Conference, Paris, Oct.3-7,2000
G. L. Matthaei, L. Young and E. M. T. Lones, Microwave Filters Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures. New York McGraw-Hill, 1964.

作者介绍

柳光福（1944—），男，上海埃德电磁技术有限公司总工程师、研究员。1967 年毕业于成都电讯工程学院。主要从事电磁干扰控制器件、移动通讯天线模块和微波滤波器的研究与制造。

刘启明（1941—），男，上海埃德电磁技术有限公司高级工程师。1967 年毕业于大连工学院。主要从事电磁干扰控制器件、移动通讯天线模块和微波滤波器的研究与制造。