

射频信道“变型电桥原理”自动增益控制技术

梁 淮 宁

(中国科学院电子学研究所 100190)

摘 要: 文章阐述“变型电桥原理(MEBP)”的创新思路,介绍射频信道“变型电桥原理(MEBP)”自动增益控制模型的传递函数、自动增益控制传递电压、自动增益控制的极限精度、增益控制算法和“变型电桥”平衡模型.然后阐述射频信道“变型电桥原理(MEBP)”自动增益控制方案,介绍自动增益控制传递电压的形成机理.最后列出 S 波段射频信道“变型电桥原理(MEBP)”闭环自动增益控制实验系统技术指标,利用温度实验数据绘制出增益控制精度的曲线.结果表明“变型电桥原理(MEBP)”自动增益控制的精度能够达到 0.2dB.

关键词: 变型电桥原理;自动增益控制;射频信道;变型电桥模型;增益控制精度

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2881-06

Metaphysics Electricity Bridge Principle Radio Frequency Channel Closed Loop Auto Gain Control

LIANG Huai-ning

(Institute of electronics, Chinese academy of sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: This paper presents a discovery that Metaphysics Electricity Bridge (MEB) Principle(MEBP) can be applied to the auto gain control (AGC) of the radio frequency (RF) channels, including active and passive circuits. In this paper, the basic theory of MEBP AGC is discussed, which consists of the transfer function, AGC transfer voltage, the limit gain precision of the MEBP AGC model, and the MEB balance model (MEBM). Further, the design of the MEBP AGC is provided, and the corresponding principle, AGC transfer voltage formed, is also delivered. Finally, the effectiveness of the MEBP AGC was demonstrated through S band RF channel, and the output power curve was plotted out of the temperature experiment data. The result indicates that the gain error of MEBP AGC is less than 0.2 dB.

Key words: metaphysics electricity bridge principle;MEBP AGC, RF channel;MEB model, gain controlled error

1 引言

MEBP^[1]闭环自动增益控制技术用于射频信道的增益控制.MEBP 由电桥原理^[2]的含义“派生”而得名,模型如图 2 所示,模型中的“部件”不是电阻,而是增益.MEBP 自动增益控制模型不是利用信号的负反馈方式控制增益,而是利用使增益调整衰减器的调整量 Δ_L (dB)与模型总增益的改变量 Δ_G (dB)大小相等、方向相反,从而可以相互抵消的原理,保持射频信道总增益的动态稳定.

MEBP 自动增益控制采用衰减器作为增益调整器件,根据衰减器的“控制-衰减”特性,设计增益控制算法,用算法产生控制信号,精确控制衰减器的衰减量.由于 MEBP 属于闭环自动增益控制技术,因此,增益控制的响应速度快、补偿范围大和稳定精度高,是一种新的射频信道闭环自动增益控制的好方法.

本文提到的射频信道可以有源信道,也可能是无

源信道,信道内部可以是一个部件,也可是复杂网络.

图 1 是传统的闭环自动增益控制模型^[2],模型的传递函数如

$$K = K_1 / (1 + K_1 K_2)$$

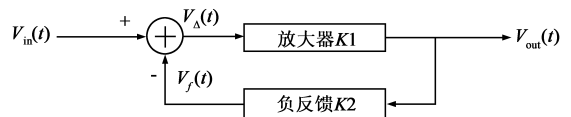


图1 传统的闭环自动增益控制模型

如果将图 1 用于射频信道的自动增益控制,最大的困难是找不到射频“加法器”,因此,传统的闭环自动增益控制原理不适用于射频电路.现有的射频电路的自动增益控制一般都采用开环技术,开环增益控制技术的缺点是增益控制精度低,误差大.

2 变型电桥原理(MEBP)自动增益控制

2.1 变型电桥原理(MEBP)自动增益控制模型

图 2 是 MEBP 自动增益控制模型,图中的“部件”不是电阻,而是增益.

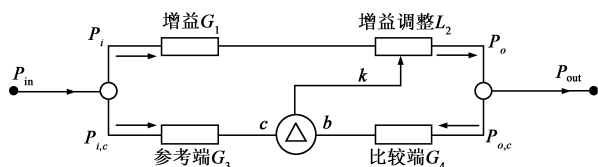


图2 MEBP自动增益控制模型

图2中： G_1 为射频信道增益(射频无源信道用 Q_1 , Q_1 表示衰减)； L_2 为射频衰减器,用以调整总增益； O 为输入端节点和输出端节点； Δ 为差分运算单元； P_i 为射频信道输入功率； P_o 为增益调整器的输出功率； $P_{i,c}$ 为参考支路输入功率； G_3 为参考支路增益； $P_{o,c}$ 为比较支路输入功率； G_4 为比较支路增益； P_{in} 为总输入功率； P_{out} 为总输出功率； c 为参考支路输出端； b 为比较支路输出端； k 为自动增益控制传递电压。

图2中的约束条件是：

$$G_3 = G_4 \text{ (或 } G_3(\text{dB}) = G_4(\text{dB}), \quad (1)$$

$$x = y \text{ (或 } x(\text{dB}) = y(\text{dB}))$$

式(1)中, x 和 y 的定义见下节。

2.2 变型电桥原理(MEBP)自动增益控制模型传递函数、自动增益控制传递电压和自动增益控制的极限精度。

(1)MEBP自动增益控制模型的传递函数。

图2MEBP自动增益控制模型(以下简称MEBP模型)的总增益为 G ：

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_o - P_{o,c}}{P_i + P_{i,c}} = G_1 \cdot L_2 \cdot \frac{1 - y}{1 + A} \quad (2)$$

式(2)中, y 为输出端节点分流比(定向耦合器的耦合度可以看成分流比), $y = \frac{P_{c,o}}{P_o}$; Y 为输出端节点直通比, $Y = (1 - y) = \frac{P_{out}}{P_o}$;

x 为输入端节点分流比, $x = \frac{P_{i,c}}{P_{in}}$; X 为输入端节点直通比, $X = (1 - x) = \frac{P_i}{P_{in}} = \frac{1}{1 + A}$, $A = \frac{P_{i,c}}{P_i}$ 。

将 $Y = (1 - y)$ 和 $X = \frac{1}{1 + A}$ 代入式(2), 再对式(2)取分贝运算得到：

$$G(\text{dB}) = G_1(\text{dB}) + L_2(\text{dB}) + Y(\text{dB}) + X(\text{dB}) \quad (3)$$

式(3)是图2的传递函数, 也叫模型的总增益。

(2)MEBP自动增益控制传递电压 k 。

图2MEBP模型中的 k 表示自动增益控制传递电压, k 定义为比较端输出信号电压的分贝值 $v_b(\text{dBmV})$ 与参考端输出信号电压的分贝值 $v_c(\text{dBmV})$ 之差, $k = v_b(\text{dBmV}) - v_c(\text{dBmV})$, 其中,

$$v_b(\text{dBmV}) = v(P_{in})(\text{dBmV}) + X(\text{dB}) + G_1(\text{dB}) + L_2(\text{dB}) + y(\text{dB}) + G_4(\text{dB}) \quad (4-1)$$

$$v_c(\text{dBmV}) = v(P_{in})(\text{dBmV}) + x(\text{dB}) + G_3(\text{dB}) \quad (4-2)$$

$v(P_{in})$ 表示与输入功率 P_{in} 有关的检波电压值。根据约

束条件式(1), 对 $v_c(\text{dBmV})$ 和 $v_b(\text{dBmV})$ 取差分运算并化简后得到,

$$k = v_b(\text{dBmV}) - v_c(\text{dBmV}) = X(\text{dB}) + G_1(\text{dB}) + L_2(\text{dB}) \quad (5)$$

式(5)中, k 的测量单位是毫伏, 但是 k 的真实含义是增益(dB)。 k 被送往增益调整衰减器 L_2 的控制端, 用于控制衰减量 $L_2(\text{dB})$ 。衰减器 L_2 的“控制-衰减”特性是: 当增益控制传递电压 k 线性变化时, 衰减量 $L_2(\text{dB})$ 也为线性变化, k 的线性度非常重要。 k 的变化只与MEBP模型总增益 $G(\text{dB})$ 的变化有关, 而与输入功率 P_{in} 的变化无关。怎样保证 k 的线性度? 这一问题将在本文的第3部分“变型电桥原理”自动增益控制方案中介绍。

(3)MEBP自动增益控制模型的极限精度。

MEBP模型自动增益控制的极限精度是指理论上能够达到的最佳精度。定义极限精度等于传递函数 $G(\text{dB})$ 与增益控制传递电压 k 之差, 将式(3)和(5)带入得到差值:

$$Y(\text{dB}) = G(\text{dB}) - k \quad (6)$$

式(6)中 $Y(\text{dB})$ 是MEBP模型输出端节点的直通比, 而 $Y(\text{dB})$ 的变化 $\Delta_Y(\text{dB})$ 不受自动增益控制, $\Delta_Y(\text{dB})$ 等于:

$$\Delta_Y(\text{dB}) = Y_2(\text{dB}) - Y_1(\text{dB}) \quad (7)$$

直通比 $Y(\text{dB}) = \xi(\text{dB})$ 的值见表1。

表1 $\xi(\text{dB})$ 的值

分流比 $y(\text{dB})$ \ 直通比	$\xi(\text{dB}) = Y(\text{dB})$	说明
$10^{-0.8} \rightarrow -8$	-0.7494	y 是 P_o 的分流比, Y 是 P_o 的直通比, $Y(\text{dB}) = \xi_Y(\text{dB})$. 产生图2MEBP模型增益误差的原因是输出端节点直通比的变化 $\Delta_Y(\text{dB})$.
$10^{-0.9} \rightarrow -9$	-0.584352	
$10^{-1} \rightarrow -10$	-0.457575	
$10^{-1.1} \rightarrow -11$	-0.359445	
$10^{-1.2} \rightarrow -12$	-0.283048	
$10^{-1.3} \rightarrow -13$	-0.223307	
$10^{-1.4} \rightarrow -14$	-0.176431	
$10^{-1.5} \rightarrow -15$	-0.139554	
$10^{-1.6} \rightarrow -16$	-0.110483	
$10^{-1.7} \rightarrow -17$	-0.087529	

Δ_Y 与 $y(y = x)$ 的取值有关, 当 y 发生变化时, Y 随之变化, 使 $\Delta_Y \neq 1$ 。根据表1数据可知, 当 $y(\text{dB})$ 小于 $-12(\text{dB})$ 和变化量小于等于 $|\pm 1(\text{dB})|$ 时, 输出端直通比的改变量 $\Delta_Y(\text{dB})$ 即MEBP模型的极限精度均可以满足小于等于 $0.076397(\text{dB})$ 。

假设, 分流比 $y(\text{dB}) = -15(\text{dB})$, 查表1得到直通比 $Y_1(\text{dB}) = -0.139554(\text{dB})$, 当 $y(\text{dB})$ 变化了 $+1(\text{dB})$ 成为 $-14(\text{dB})$ 时, 查表1得到直通比 $Y_2(\text{dB}) = -0.176431(\text{dB})$, 将 $Y_2(\text{dB})$ 和 $Y_1(\text{dB})$ 带入式(7), 得到

MEBP 模型的极限精度 $\Delta_Y(\text{dB})$ 等于:

$$\Delta_Y(\text{dB}) = Y_2(\text{dB}) - Y_1(\text{dB}) = -0.036877(\text{dB}).$$

由于输入端节点的位置处于自动增益控制的回路中,因此当输入端节点的分流比发生变化成为 $x(\text{dB}) + \Delta_x(\text{dB})$,直通比成为 $X(\text{dB}) + \Delta_X(\text{dB})$ 时,MEBP 模型可以通过自动增益控制机制补偿变化量 $\Delta_x(\text{dB})$ 和 $\Delta_X(\text{dB})$. 输出端节点则分两头说,输出端节点分流比 $y(\text{dB})$ 的位置处于自动增益控制的回路中,其变化量 $\Delta_y(\text{dB})$ 可以通过自动增益控制机制得到补偿,而直通比 $Y(\text{dB})$ 的位置不处于自动增益控制的回路中,其变化量 $\Delta_Y(\text{dB})$ 不能得到增益控制机制的补偿,因此 $\Delta_Y(\text{dB})$ 成为 MEBP 模型自动增益控制的极限精度,即不可超越的精度.

2.3 “变型电桥”平衡现象

图 2MEBP 模型的传递函数为式(3),

$$G(\text{dB}) = G_1(\text{dB}) + L_2(\text{dB}) + Y(\text{dB}) + X(\text{dB}) \quad (3)$$

当 MEBP 模型总增益 $G(\text{dB})$ 发生变化成为 $G(\text{dB}) + \Delta_G(\text{dB})$ 时,MEBP 模型自动增益控制将做出联锁反应去抵制这种变化,使 MEBP 模型的总增益稳定在 $G(\text{dB})$ 上. 以下介绍自动增益控制算法的运行步骤,以及总增益稳定后出现的“变型电桥”平衡现象.

2.3.1 自动增益控制算法步骤

算法步骤中函数公式的变量用脚标区分正常状态和增益发生变化后的状态.

(1) 计算正常状态的增益控制传递电压 k_0 . 设正常状态,比较端输出电压的分贝值为 $v_{b,0}(\text{dBmV})$,

$$v_{b,0}(\text{dBmV}) = v(P_{in})(\text{dBmV}) + X_0(\text{dB}) + G_{1,0}(\text{dB}) + L_{2,0}(\text{dB}) + y_0(\text{dB}) + G_{4,0}(\text{dB}) \quad (8-1)$$

参考端输出电压的分贝值为 $v_{c,0}(\text{dBmV})$,

$$v_{c,0}(\text{dBmV}) = v(P_{in})(\text{dBmV}) + x_0(\text{dB}) + G_{3,0}(\text{dB}) \quad (8-2)$$

根据约束条件式(1),正常状态的 MEBP 模型增益控制传递电压 k_0 为

$$k_0 = v_{b,0}(\text{dBmV}) - v_{c,0}(\text{dBmV}) = X_0(\text{dB}) + G_{1,0}(\text{dB}) + L_{2,0}(\text{dB}) \quad (9)$$

k_0 用于设定正常状态时增益调整衰减器 L_2 的控制电压 $v_{L,0}$, $v_{L,0}$ 用以设定正常状态时增益调整的衰减量 $L_{2,0}(\text{dB})$. k_0 一旦确定(电路参数确定)后,总输入功率 P_{in} 的变化将不会影响 k_0 的值, P_{in} 的变化只会在总输出功率 P_{out} 的变化中如实地反应出来.

(2) 计算任意状态增益控制传递电压 k . 当 G_1 、 L_2 、 X 、 Y 发生变化时,MEBP 模型总增益会发生变化,成为 $G_0 + \Delta G$, 记 MEBP 模型总增益的相对变化量为 Δ_G ,

$$\Delta_G = \frac{G_0 + \Delta G}{G_0}$$

$$= \frac{(G_{1,0} + \Delta G_1) \cdot (L_{2,0} + \Delta L_2) \cdot (Y_0 + \Delta Y) \cdot (X_0 + \Delta X)}{G_{1,0} \cdot L_{2,0} \cdot Y_0 \cdot X_0} = \Delta_{G_1} \cdot \Delta_{L_2} \cdot \Delta_Y \cdot \Delta_X \quad (10-1)$$

式(10-1)中, Δ_G 是总增益 G 的相对变化量, $\Delta_{G_1,0}$ 是射频信道增益 $G_{1,0}$ 的相对变化量, Δ_{L_2} 是增益调整衰减 $L_{2,0}$ 的相对变化量, Δ_Y 是输出端节点直通比 Y_0 的相对变化量, Δ_X 是输入端节点直通比 X_0 的相对变化量. 对式(10-1)做分贝运算,得到 $\Delta_G(\text{dB})$,

$$\Delta_G(\text{dB}) = \Delta_{G_1}(\text{dB}) + \Delta_{L_2}(\text{dB}) + \Delta_Y(\text{dB}) + \Delta_X(\text{dB}) \quad (10-2)$$

式(10-2)中, $\Delta_G(\text{dB})$ 为 $G(\text{dB})$ 的改变量, $\Delta_{G_1}(\text{dB})$ 叫 $G_{1,0}(\text{dB})$ 的改变量, $\Delta_{L_2}(\text{dB})$ 叫 $L_{2,0}(\text{dB})$ 的改变量, $\Delta_Y(\text{dB})$ 叫 $Y_0(\text{dB})$ 的改变量, $\Delta_X(\text{dB})$ 叫 $X_0(\text{dB})$ 的改变量, 同时 $\Delta_Y(\text{dB}) = \Delta_X(\text{dB})$.

当 MEBP 模型总增益变化了 $\Delta_G(\text{dB})$ 时,比较支路的输出电压 $v_b(\text{dBmV})$ 跟随着变化,成为:

$$v_b(\text{dBmV}) = v(P_{in})(\text{dBmV}) + X_0(\text{dB}) + G_{1,0}(\text{dB}) + L_{2,0}(\text{dB}) + \Delta_G(\text{dB}) + y(\text{dB}) + \Delta_Y(\text{dB}) + G_{4,0}(\text{dB}) + \Delta_{G_4}(\text{dB}) \quad (11-1)$$

式(11-1)中 $\Delta_Y(\text{dB})$ 是输出端节点分流比的改变量,

$$\Delta_Y(\text{dB}) = \frac{y_0 + \Delta y}{y_0}(\text{dB}); \Delta_{G_4}(\text{dB}) \text{ 是比较支路增益 } G_{4,0}(\text{dB}) \text{ 的改变量, } \Delta_{G_4}(\text{dB}) = \frac{G_{4,0} + \Delta G_4}{G_{4,0}}(\text{dB}). \text{ 此时,参考支路的输出电压为:}$$

$$v_c(\text{dBmV}) = v(P_{in})(\text{dBmV}) + x_0(\text{dB}) + \Delta_x(\text{dB}) + G_{3,0}(\text{dB}) + \Delta_{G_3}(\text{dB}) \quad (11-2)$$

式(11-2)中 $\Delta_x(\text{dB})$ 是输入端节点分流比的改变量,

$$\Delta_x(\text{dB}) = \frac{x_0 + \Delta x}{x_0}(\text{dB}), \Delta_{G_3}(\text{dB}) \text{ 是参考支路增益 } G_{3,0}(\text{dB}) \text{ 的改变量, } \Delta_{G_3}(\text{dB}) = \frac{G_{3,0} + \Delta G_3}{G_3}(\text{dB}), \text{ 同时,}$$

$\Delta_x(\text{dB}) = \Delta_y(\text{dB})$. 那么,任意状态 MEBP 模型的自动增益控制传递电压 k 为:

$$k = v_b(\text{dBmV}) - v_c(\text{dBmV}) = X(\text{dB}) + G_{1,0}(\text{dB}) + L_{2,0}(\text{dB}) + \Delta_G(\text{dB}) \quad (12-1)$$

式(12-1)中,由于约束条件式(1)的限制, $G_{3,0}(\text{dB})$ 和 $G_{4,0}(\text{dB})$ 的变化不会影响增益控制传递电压 k 的值(方案设计提供保证). 将式(9)带入式(12-1)得到,

$$k = k_0 + \Delta_G(\text{dB}) = k_0 + \Delta k \quad (12-2)$$

其中 Δk 是 k 的增量,显然,

$$\Delta k = \Delta_G(\text{dB}) \quad (13)$$

$$(3) \text{ 计算 } \Delta k. \quad \Delta k = k - k_0 \quad (14)$$

Δk 用于计算增益调整衰减器 L_2 的控制电压 $v_{L,0}$ 的增量 Δv_L . 假设 L_2 为数控衰减器,衰减步进为 $\Delta_n(\text{dB})$ (如 $0.2(\text{dB})$), 定义 $\Delta_n(\text{dB})$ 同样也是 MEBP 模型总增益

G (dB)的单位增益. 当总增益变化为 G_0 (dB) + Δ_n (dB) 时, 相应地, 增益控制传递电压变为 $k_0 + m$, m 为 k 的单位增量; 衰减器的控制电压变为 $v_{L,0} + dv_L$, dv_L 为 v_L 的单位增量; dv_L 等于:

$$dv_L = \frac{\Delta_n(\text{dB})}{m} \cdot M$$

M 为常数, 调整 M 使 dv_L 产生的衰减器调整量 d_L (dB) = Δ_n (dB); 那么当增益控制传递电压变化 Δk 时, 相应的衰减器控制电压 v_L 的改变量为 Δv_L ,

$$\Delta v_L = \frac{\Delta k}{m} \cdot M,$$

此时, L_2 的控制电压成为 $v_{L,0} + \Delta v_L$.

如果增益调整 L_2 是模拟衰减器, 需要增加 D/A 变换器.

(4) 计算衰减器的调整量 Δ_L (dB). 当衰减器 L_2 的控制电压增量为 Δv_L 时, 衰减器的调整增量为 Δ_L (dB),

$$\Delta_L(\text{dB}) = \frac{\Delta v_L}{dv_L} \cdot \Delta_n(\text{dB}) = \Delta k, \quad (15)$$

式(15)中, 因为 $\Delta k = \Delta_C(\text{dB})$, 所以 $\Delta_L(\text{dB}) = \Delta_C(\text{dB})$,

$$\begin{aligned} \Delta_L(\text{dB}) &= \Delta_C(\text{dB}) \\ &= \Delta_{G1}(\text{dB}) + \Delta_{L2}(\text{dB}) + \Delta_Y(\text{dB}) + \Delta_X(\text{dB}) \end{aligned} \quad (16)$$

至此, 衰减器的总衰减量为 $L(\text{dB}) = L_{2,0}(\text{dB}) + \Delta_{L2}(\text{dB}) + \Delta_L(\text{dB})$ 的代数. 由于“衰减”与“增益”是一对大小相等, 方向相反的量, 一般又将式(16)写成

$$|\Delta_L(\text{dB})| = |\Delta_C(\text{dB})| \quad (17)$$

2.3.2 “变型电桥”平衡现象

(1) 验证 MEBP 自动增益控制效果. 假设 MEBP 模型总增益发生变化成为 G_0 (dB) + Δ_C (dB), 自动增益控制过程将出现连锁反应如下:

$$\begin{aligned} G_C(\text{dB}) &= G_{1,0}(\text{dB}) + L_{2,0}(\text{dB}) + Y_0(\text{dB}) + X_0(\text{dB}) \\ &+ \Delta_C(\text{dB}) + \Delta_L(\text{dB}) = G_{1,0}(\text{dB}) + L_{2,0}(\text{dB}) \\ &+ Y_0(\text{dB}) + X_0(\text{dB}) = G_0(\text{dB}) \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)表明调整后的 MEBP 模型总增益 G_C (dB) 等于正常增益 G_0 (dB). 至此, 完成了 MEBP 闭环自动增益控制过程, 使 MEBP 模型的总增益保持不变.

(2) “变型电桥”平衡现象. 当自动增益控制过程完成后, 必然有 $|\Delta_L(\text{dB})| = |\Delta_C(\text{dB})|$. 根据图 2 的约束条件式(1), 从而有式(19)成立,

$$\frac{|\Delta_C(\text{dB})|}{G_3(\text{dB})} = \frac{|\Delta_L(\text{dB})|}{G_4(\text{dB})} \quad (19)$$

式(19)是 MEBP 模型总增益动态稳定后, MEBP 模型总增益的增量和衰减器的增量达到平衡后的表达式. 其中, Δ_C (dB) 是 MEBP 模型总增益的增量; Δ_L (dB) 是衰减器的增量; G_3 (dB) 是参考支路增益; G_4 (dB) 是比较支路增益. 由于式(19)是基于图 2MEBP 模型得到的表达式,

同时式(19)又相似于惠斯通电桥的表达形式, 因而派生出“变型电桥”平衡模型如图 4 所示.

图 3 是惠斯通电桥^[3], 著名的电桥原理: 当 $V_{ab} = 0$ 时, 惠斯通电桥 a 、 b 两点对地电压获得平衡, $V_a = V_b$, 从而有 $\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$.

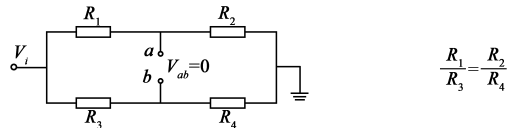


图3 惠斯通电桥

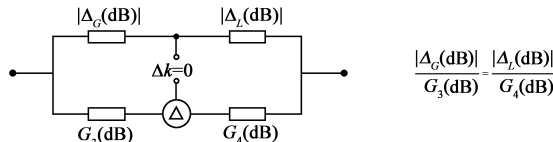


图4 变型电桥平衡模型

图 4 是变型电桥平衡模型, 当增益控制传递电压 k 的增量 $\Delta k = 0$ 时, MEBP 模型增益调整器的增量等于总增益的增量, 有 $|\Delta_L(\text{dB})| = |\Delta_C(\text{dB})|$, 出现“变型电桥”平衡现象.

变型电桥平衡模型, 是一种抽象模型, 不存在具体电路, 但是这种抽象模型是经过缜密设计和反复验证, 证明了确实是客观存在的模型. 变型电桥平衡现象这样描述: 当图 2 的比较端电压 v_b (dBmV) 与参考端电压 v_c (dBmV) 的差分值 k 的改变量 $\Delta k = 0$ 时, 衰减器的调整增量 $|\Delta_L(\text{dB})|$ 恰好等于总增益的改变量 $|\Delta_C(\text{dB})|$, 出现“变型电桥”平衡现象, 使 MEBP 模型总增益获得动态稳定, 变型电桥平衡模型如图 4 所示.

3 变型电桥原理 (MEBP) 自动增益控制方案

图 5 是射频信道 MEBP 自动增益控制原理方案. 图 5 的约束条件是式(1). 图中, G_1 : 射频有源信道增益; L_2 : 射频衰减器, 用以调整总增益; $P_{i,c}$: 参考端耦合信号功率; $v_{i,c}$: 参考端检波输出信号电压; $P_{o,c}$: 比较端耦合信号功率; $v_{o,c}$: 比较端检波输出信号电压; V_c : 参考支路输出信号; V_b : 比较支路输出信号; K : 选择开关; A/D: 模数转换器; 算法处理器: FPGA 芯片.

增益调整器件采用衰减器, 衰减器 L_2 的“控制—衰减”特性是: 控制电压的变化 Δv_L 与衰减量的变化

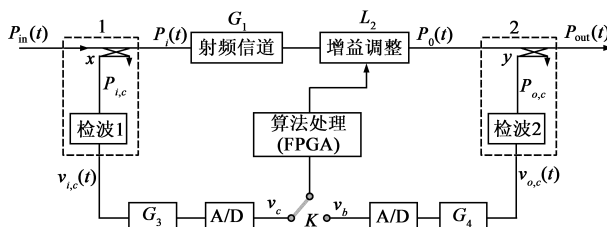


图5 射频信道MEBP自动增益控制原理方案

Δ_L (dB)成线性关系. 为了精确控制总衰减量 L_2 (dB), 必须确保自动增益控制传递电压的改变量 Δk 相对于 MEBP 模型总增益的改变量 Δ_G (dB) 满足线性关系(呈 1:1), 使 Δk 的大小只与总增益的改变量 Δ_G (dB) 有关, 而与输入功率 P_{in} (dBmW) 的变化无关. 解决的方法是: 利用射频检波二极管 $V-I$ 特性的指数关系^[4], 变指数关系为线性关系. 具体做法是对参考端输出信号电压 v_c 和比较端输出信号电压 v_b 做分贝运算, 得到 v_c (dBmV) 和 v_b (dBmV), 从而将指数电压变为线性电压. 这里, v_c (dBmV) 和 v_b (dBmV) 线性度的一致性确保 k 具有良好线性度的重要条件. 实现机理如下:

射频检波二极管的 $V-I$ 特性为指数特性, 检波电流 I_C 的表达式为:

$$I_C = I_S \cdot (e^{V/V_T} - 1) \quad (20)$$

式(20)中, I_S : 反向饱和电流; V : 微波二极管两端电压, $V = V_Q + V_d$, V_Q 为直流偏置, V_d 为载波频率电压分量; V_T : 常温下 300K 时, $V_T = 26\text{mV}$. I_C 经过检波负载电阻 r , 在 r 两端产生检波电压 v , v 为毫伏量级, 表达式为:

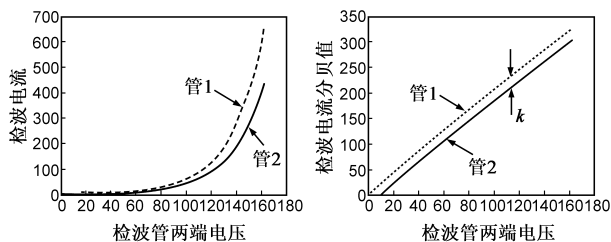
$$v = I_C \cdot r = I_S \cdot r \cdot (e^{V/V_T} - 1) \quad (21)$$

对式(21)两边取分贝运算, 得到:

$$v(\text{dBmV}) = 20\lg(I_S) + 20\lg(r) + 20\lg(e^{V/V_T} - 1) \quad (22)$$

式(22)具有很好的线性特性. 图 5 中的参考端和比较端定向耦合检波器的输出电压是 $v_{i,c}(t)$ 和 $v_{o,b}(t)$, 具有与式(22)相似的指数模型, 不难证明 v_c (dBmV) 和 v_b (dBmV) 同样具有很好的线性一致性.

图 6(a) 是射频检波二极管对管的 $V-I$ 特性仿真曲线, 由于管 1 和管 2 的等效电路不同, 对管的两条曲线不重合, 斜率处处不一样. 图 6(b) 是对图 6(a) 的 $V-I$ 特性曲线的电流值取分贝运算后的曲线. 图 6(b) 中是两条理论直线, 两条曲线之间在纵轴方向的距离就是式(12-1)中的 k , $k = k_0 + \Delta k$, k 的大小取决于图 5 MEBP 自动增益控制原理方案的总增益 G_0 (dB), Δk 取决于 G (dB) 的改变量 Δ_G (dB), k 和 Δk 与输入功率的变化无关.



(a) 射频检波二极管 $V-I$ 特性仿真曲线, (b) 对(a)曲线的电流值取分贝运算管2的等效电路不同于管1

图6

4 S 波段射频放大器变型电桥原理自动增益控制实验

4.1 电路技术指标

频率	S 波段;
脉冲重复周期	3300Hz;
延迟时间	50 μ S;
射频增益	$\geq 40\text{dB}$;
输入功率	-10dBmW ~ +6dBmW;
射频信道增益变化	0dB, 1dB, 2dB, 3dB, 4dB;
输入输出端驻波比	$\rho \leq 1.4$;
增益控制精度	$\leq 0.2\text{dB}$ ^[5] .

4.2 实验数据

S 波段延迟、有源信道 MEBP 自动增益控制电路的实验条件是: 环境温度为 0 $^{\circ}\text{C}$ ~ 60 $^{\circ}\text{C}$, 输入信号功率为 -10dBmW ~ +6dBmW (2dB 步进); 射频信道总增益变化 Δ_G (dB) 为 0dB ~ 4dB (1dB 步进). 图 7 为温度 +10 $^{\circ}\text{C}$ 时, 实验电路输出功率的测试数据 P_{out} (dBmW) 相对于输入信号功率 P_{in} (dBmW) 和总增益改变量 Δ_G (dB) 的二维曲面. 纵坐标表示输出功率 P_{out} (dBmW), 二维横坐标分别表示输入功率 P_{in} (dBmW) 和总增益的改变量 Δ_G (dB). 由图 7 可知, 在 MEBP 闭环自动增益控制的作用下, 当“S 波段延迟、有源信道 MEBP 自动增益控制电路”的总增益变化 0dB ~ 4dB 时, MEBP 自动增益控制能够精确地补偿总增益的变化, 增益控制精度 $\leq 0.2\text{dB}$, 使射频输出功率 P_{out} (dBmW) 与射频输入功率 P_{in} (dBmW) 之间呈现很好的线性关系. 这种线性关系能够适应较宽的温度变化范围^[6].

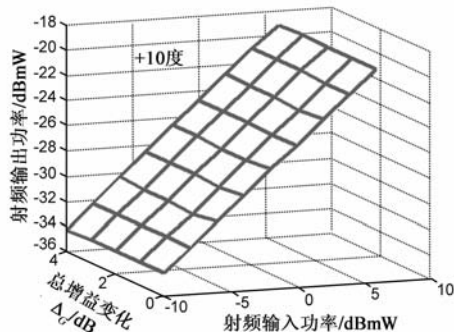


图7 S波段射频信道MEBP自动增益控制电路的输出功率曲面. 纵坐标表示输出功率 P_{out} (dBmW), 二维横坐标分别表示射频输入功率 P_{in} (dBmW) 和总增益改变量 Δ_G (dB)

5 结束语

MEBP 自动增益控制方法是一项发明, 适用于有源射频信道和无源射频信道. MEBP 模型的输出功率等于输入功率与总增益的乘积. 理想的具有 MEBP 自动增益控制能力的射频信道, 其输出功率的变化应与总增益

的变化无关,而与输入功率的变化成 1:1 的线性关系. 本文中的实验电路,增益调整器件是数控衰减器,数控衰减器的步进为 0.2dB,增益控制精度为 0.2dB. 研究还表明,MEBP 闭环自动增益控制技术不但能够精确地补偿 MEBP 模型总增益的变化,而且电路简单,可靠性高.

参考文献:

- [1] 梁准宁. 基于变型电桥原理的射频放大器增益自动控制方法[P]. 中国专利: ZL 2007 1 01200556.
- [2] George Biernson. Principles of Feedback Control, Volume 2: Advanced Control Topics[M]. USA: Wiley-Intersciences Publication, 1989.
- [3] 谭兴文, 韩力. 惠斯通电桥灵敏度的探究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2008, 33, (4): 149 - 152.
TAN Xing-wen, HAN Li. The research on sensitivity of Wheatstone electric bridge[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2008, 33, (4): 149 - 152. (in Chinese)
- [4] 冷朋. 基于二极管检波的功率测量技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- Leng Peng. Based on Diode Detection Power Measurement Study[D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)
- [5] 王韧. YGS52331 技术说明书[R]. 成都: 四川成都亚光微波电路与系统研究所, 2006.
- [6] 金廷满. 高精度内定标方案和内定标信号处理技术[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2007.
Jin Ting-man. Design of High Precision Internal Calibration Instrument and Signal Processing of Internal Calibration[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in chinese)

作者简介:



梁准宁 女, 博士, 研究员, 中国电子学会高级会员. 主要研究方向: 1. 高精度 SAR 内定标技术. 2. 射频信道“变型电桥原理”自动增益控制技术. 3. 极化 SAR 定标技术. 在国内外学术期刊和学术会议发表论文数十篇.

E-mail: liang708@263.net