نقل إشارة صورة حقيقية على قناة اتصال ميكروية باستخدام مركب ترددي يعتمد حلقة الإقفال الطوري[1]

المهندس أسامة حرفوش[2] **الدكتور عبد الرزاق البدوية[3]**

الدكتور خالد يزبك[4]

الملخص

هدف البحث إلى تصميم حامل معدل بإشارة صورة حقيقية حيث يتم توليد الحامل باستخدام مركب ترددي ذي حلقة إقفال طوري لضمان ثباتية الحامل الترددي واستقراره.

يعتمد مبدأ عمل حلقة الإقفال الطوري على المحافظة على فرق طور ثابت بين إشارتين. فأي تغير في طور إحداهما نسبة إلى أخرى تعمل الحلقة على إزالته، ومن ثَمَّ من الصعب جعل حلقة الإقفال الطوري تقبل تعديلا ترددياً بعرض مجال أعلى من المجال الصوتي.

تعدُّ هذه الخاصية في حلقة الإقفال الطوري إيجابية من جهة لتخفيض الضجيج المرافق للتردد وضمان ثباتيته وسلبية من جهة أخرى لأنها تمنع الحلقة من قبول التعديل الترددي.

قدمت هذه المقالة حلاً عملياً لجعل المركب الترددي يقبل تعديلاً ترددياً بعرض مجال إشارة صورة حقيقية. صممنا لهذا الغرض مركباً ترددياً ميكروياً يعتمد مبدأ حلقة الإقفال الطوري، ويعمل في المجال الترددي x ، ويضم دارة المعدل المناسبة لنقل إشارة الصورة عبر الحامل المولد بالمهتز المحكوم بالجهد ضمن حلقة الإقفال الطوري

[1] أعد البحث في سياق رسالة الدكتوراه للطالب أسامة حرفوش بإشراف الدكتور عبد الرزاق البدوية ومشاركة الدكتور خالد يزبك.

[2] قسم الاتصالات – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق.

[3] أستاذ مساعد– قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق.

[4] باحث رئيسي– المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا– جامعة دمشق.

المقدمة:

يواجه نقل إشارة صورة بجودة عالية عبر قناة اتصال ميكروية تحديات كبيرة خاصة من أجل تطبيقات النقل في الزمن الحقيقي. بشكل عام تتلخص هذه التحديات بالحفاظ على الجودة العالية للصورة دون زيادة عرض مجال الإرسال ومعالجة المشاكل الناجمة عن قناة الاتصال الميكروية (الخفوت، التداخل، تعدد المسارات).

يتم عادة نقل إشارة الصورة باستخدام التعديل المطالي AM رغم مشاكله من ناحية الضجيج، ولأن التعديل الترددي FM يتطلب استقراراً عالياً في التردد الحامل، أدى ذلك إلى استخدام صمامات تؤمن عرض المجال الترددي لنقل إشارة الصورة وتتمتع بخاصية الضبط الآلي للتردد. مما يعني زيادة الكلفة وصعوبة التنفيذ ولاسيَّما إذا أخذنا بالحسبان قصر عمر الصمام. أدى التطور التكنولوجي في يومنا الحاضر إلى توافر حلقات الإقفال الطوري لتأمين استقرار التردد، وتوافر مهتزات الحامل مع إمكانية التعديل الترددي ولكن بعرض مجال ضيق.

دفعتنا الحاجة إلى نقل إشارة الصورة بالزمن الحقيقي إلى إيجاد طريقة تجعل حلقة الإقفال الطوري تقبل تعديلاً ترددياً بعرض مجال الصورة.

1. المبدأ النظري:

هدفت دراسة حلقة الإقفال الطوري والمعدل الترددي وإيجاد النموذج الرياضي المكافئ إلى استنتاج المعاملات التي تؤدي دوراً أساسياً في الحصول على مجال ترددي عريض لدارة المعدل الترددي ، لنقل إشارة الصورة عليه.

هدفت الدراسة النظرية إلى ربط هذه المعاملات بمجموعة من عناصر الدارة المكافئة لكل من مكونات حلقة الإقفال الطوري والمركب الترددي.

2. حلقة الإقفال الطوري Phase Locked Loop:

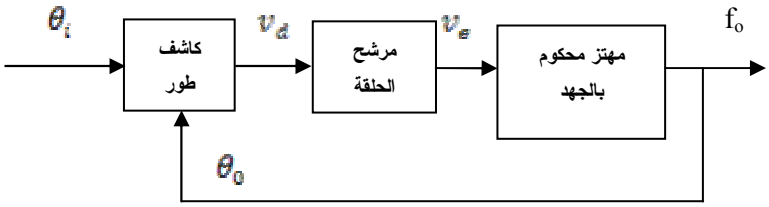
حلقة إقفال الطور هي حلقة تحكم، حيث يمثل طورا إشارة الدخل وإشارة التحكم فيها متحولات التغذية الخلفية التي يتم من خلالها بناء الحلقة وعلاقاتها النظرية. [4] تقوم

الحلقة بملاحقة تغيرات فرق الطور بين إشارتي الدخل والتغذية الخلفية وتخفيض فرق الطور هذا إلى أن يصبح مساوياً الصفر، عندئذٍ تحدث حالة الإقفال أو إقفال الطور تتألف الـ PLL بشكل عام من المكونات المبينة بالشكل (1)

-كاشف الطور يقيس فرق الطور بين دخليه.

مرشح تمرير منخفض يرشح إشارة خرج الكاشف ويحولها إلى جهد DC متناسب مع فرق الطور.

- مهتز محكوم بالجهد (VCO) يولد إشارة يتغير ترددها تبعاً لتغيرات الجهد المطبق على دخله.



الشكل(1) المخطط العام لحلقة الإقفال الطوري

تعدُّ حلقة ال PLL عنصرا لا خطياً بسبب احتوائها كاشف الطور وهو عنصر لا خطي، وفي حالة الإقفال يمكن نمذجة الحلقة كعنصر خطي باعتبار جهد خرج كاشف الطور متناسباً طردًا مع فرق الطور بين إشارتي دخليه[4] أي :

$$V_d = K_p(\theta_i - \theta_0)$$

وتمثل θ_0 و θ_i طوري إشارتي الدخل وخرج كاشف الطور على التوالي، ويمثل K_p معامل ربح كاشف الصفحة ويقدر بـــ V/rad باعتبار θ_0 و θ_i تقدر بالراديان أيضاً.

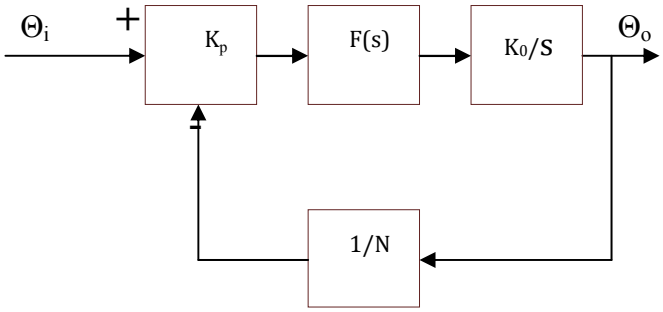
كما يمكننا نمذجة المهتز المحكوم بالجهد كعنصر خطي ينحرف تردد خرجه عن تردده الطبيعي بمقدار يتناسب مع جهد الدخل وفق العلاقة الآتية:

$$\Delta\omega = K_0 V_e$$

حيث V_e جهد خرج مرشح التمرير المنخفض و k_0 معامل ربح الـــ VCO ويقــدر Hz/v، ولما كان التردد هو مشتق الصفحة بالنسبة إلى الزمن يمكننا أن نكتب عندئذٍ:

$$\Delta\omega=\frac{d\theta_0}{dt}=K_0V_e$$

بفرض أن F(s) هو تحويل لابلاس لمرشح التمرير المنخفض يمكننا أن نعبر عن الـــ PLL بنموذج خطي، ومن ثَمَّ بالتالي يمكن أن نستنتج النمــوذج الرياضــي[4] لحلقــة الإقفال الطوري الموضحة في الشكل (2)



الشكل(2) النموذج الرياضي لحلقة الإقفال الطوري

ويكون تابع التحويل:

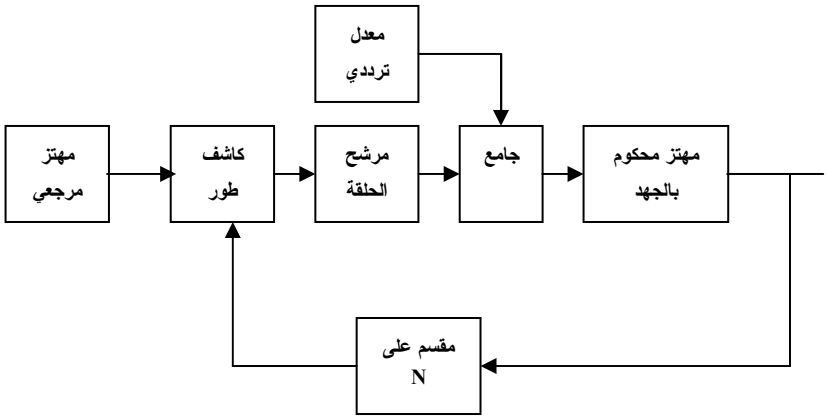
$$B(s)=\frac{\theta_0(s)}{\theta_i(s)}=\frac{k_pk_0\frac{F(s)}{s}}{1+k_pk_0\frac{F(s)}{sN}}=\frac{k_pk_0\frac{F(s)}{s}}{D} \qquad (1)$$

إذْ:

$$D=1+k_pk_0\frac{F(s)}{sN} \qquad (2)$$

3. المعدل الترددي **Frequency Modulator (FMD)** [2] [3]:

يعتمد مبدأ التعديل الترددي المعتمد في عملنا على حقن إشارة التعــديل مــع خــرج المرشح الذي يؤمن جهد توليف المهتز المحكوم بالجهد كما هو مبين في الشكل(3).



الشكل (3) التعديل الترددي في الPLL

للحصول على النموذج الرياضي للمعدل الترددي نعتمد المبدأ العام لـــدارة التعـــديل الترددي [3] المبينة في الشكل (4) ونستنتج المعادلات له كما يأتي:

$$(V_{m2}\frac{K_i}{s}+V_e)F(s)+V_{m1}=V_0$$

ومن أجل $V_{m1}=V_{m2}=V_m$

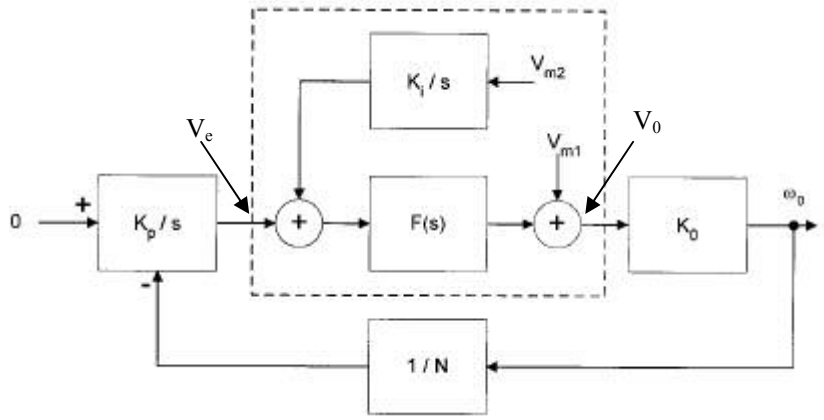
نحصل على $V_m(1+K_iF(s)/s)+V_eF(s)=V_0$

بتعويض $K_i=\frac{K_pK_0}{N}$

نحصل على $V_mD+V_eF(S)=V_0$ (5)

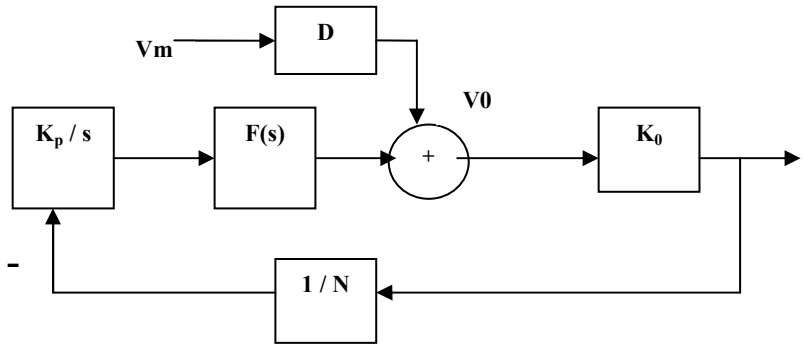
عند إقفال الحلقة يصبح جهد الخطأ V_e معدوماً ومن ثَمَّ

$V_mD=V_0$ (6)



الشكل (4) النموذج الرياضي للمعدل الترددي

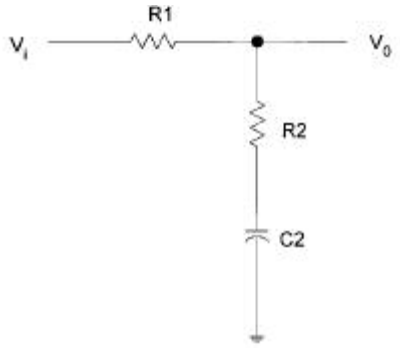
ومن ثَمَّ يجب أن يحقق المعدل تابع التحويل D الممثل بالعلاقة (2) ينتج من ذلك النموذج الرياضي لحلقة الإقفال الطوري مع التعديل الترددي [3] المبينة في الشكل (5)



الشكل (5) النموذج الرياضي لحلقة الإقفال الطوري مع التعديل الترددي

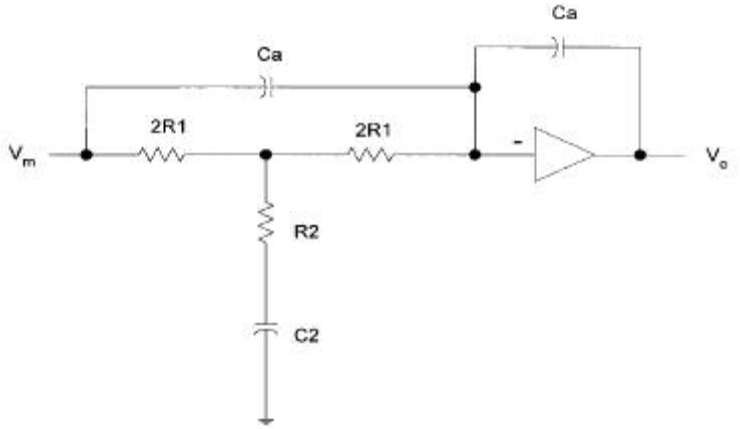
ذكرنا أن الهدف من الدراسة النظرية هو الحصول على معاملات المعدل والحلقة وربطها بعناصر الدارة المكافئة، لذلك نفرض أن لمرشح الحلقة تابع التحويل التالي المبين في الشكل (6):

$$\frac{v_o}{v_i} = F(s) = \frac{1 + sR_2C_2}{1 + s(R_1 + R_2)C_2} \qquad (7)$$



الشكل(6) المرشح

يمكن تحقيق المعادلة (6) بدارة جامع يحتوي على دارة المرشح كما هو مبـــين فـــي الشكل (7) يمكن أن نكتب تابع التحويل لدارة الجامع على نحو الآتي:



الشكل(7)المكبر الجامع مع المرشح

$$\frac{V_0}{V_m} = -(1 + F(s)/s4R_1C_a) \qquad (8)$$

يكون التابع الممثل بالعلاقة (8) مطابقاً للعلاقة (6) إذا حققت المكثفة C_a العلاقة الآتية:

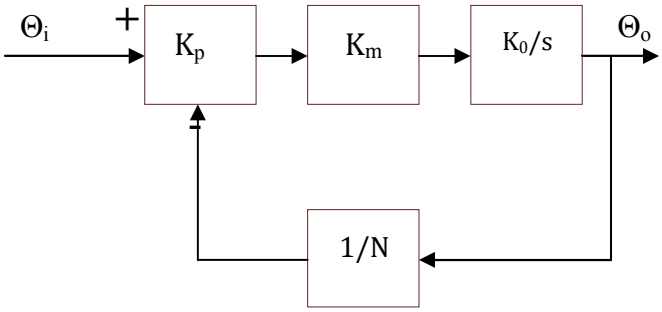
$$C_a = \frac{1}{(4R_1K_i)} = \frac{N}{(4R_1K_pK_0)} \qquad (9)$$

ومن ثَمَّ يتحقق إقفال الحلقة عندما تتحقق المعادلة (6).

نتيجة لهذه الدراسة يمكن أن نربط معاملات الحلقة (K_p، K_0) بعناصر الدارة المكافئة للمعدل R_1 و C_a، ومن ثَمَّ أصبح بالإمكان تحقيق دارة المعدل بمجال ترددي عريض عن طريق ضبط قيم كل من R_1 و C_a.

4. التنفيذ العملي:

بينت الدراسة النظرية أنه يمكن تنفيذ دارة المعدل مع المرشح بدارة جامع ضمن حلقة الإقفال الطوري، ومن ثَمَّ يصبح المخطط الصندوقي للحلقة كما هو مبين في الشكل(8)

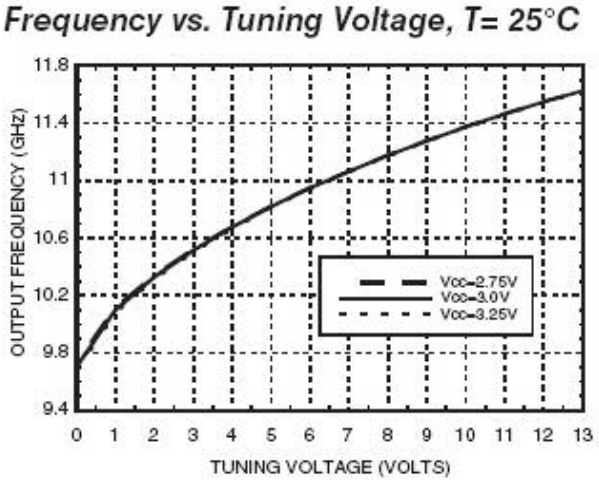


الشكل (8) المخطط الصندوقي للحلقة

نهدف في هذا الجزء العملي إلى تحويل المكونات الجزئية للمخطط الصندوقي الممثل في الشكل (8) إلى دارات عملية للحصول على دارة المركب الترددي المنشودة.

لتحقيق المعدل K_m توصلنا من الجزء النظري إلى دارة الجامع المبينة في الشكل (7) ولتأمين عرض المجال الترددي المطلوب ضُبِطَ كل من R_1 و C_a باعتماد العلاقة العملية $f_{\min} = \frac{1}{8\pi R_1 C_a}$.

لتحقيق K_0 تم اختير مهتز محكوم بالجهد HMC513lp5 [5] وبالعودة إلى منحنى الخواص المبين بالشكل (9)

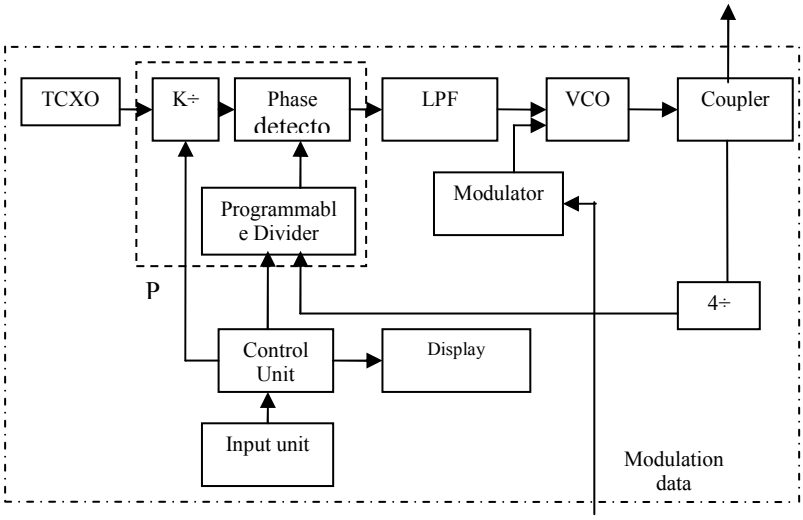


الشكل (9) منحني خواص مهتز محكوم بالجهد HMC513lp5

نختار الجزء الخطي الذي يحقق العلاقة الخطية بين جهد التوليف والتردد، (-2.5v، 10v)، (10.45-11.4GHz).

لتحقيق K_p اختيرت الدارة التكاملية MB15E06 التي تضم مقارن طور، ومقسمات قابلة للبرمجة تعمل على تردد حتى 2.5GHz لذلك استخدمنا مقسماً أولياً له نسبة تقسيم N=8.

صُمِّمَتْ دارة تحكم باستخدام معالج مع دارة إظهار للتحكم بالمقسمات المبرمجة التي تعطي قيمة التقسيم المناسبة لتوليد التردد المطلوب من المركب، ومن ثَمَّ يصبح المخطط الصندوقي للمركب الترددي كما هو مبين في الشكل (10)



الشكل (10) المخطط الصندوقي للمركب الترددي

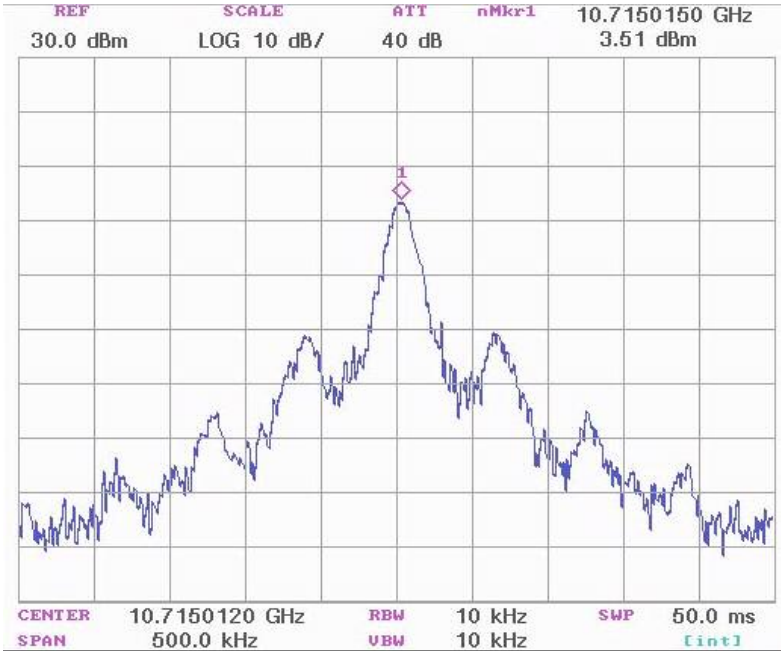
نُفِّذَتْ جميع الدارات السابقة ثم أجريت القياسات عليها.

5. الاختبارات ومناقشتها :

للتأكد من تحقيق الهدف المنشود وهو مركب ترددي يقبل تعديلاً ترددياً بعرض مجال 8MHz تم تنفيذ الدارة السابقة واختبارها عملياً على النحو الآتي:

❖ **التأكد من توليد حامل مستقر ترددياً:**

للتأكد من توليد حامل مستقر ترددياً قيس طيف الحامل الترددي دون تعديل حيث تبين أن الحلقة في حالة إقفال بعد توليد الحامل وأن الحامل مستقر بنسبة أكبر مـــن1ppm (مقدار تغير التردد ضمن مجال المسح)، ويبين الشكل (12) طيف الحامل عند المجال الترددي x band وعند تردد مسح مقداره 500KHz أي بنسبة 1MHz مـــن التـــردد الحامل.

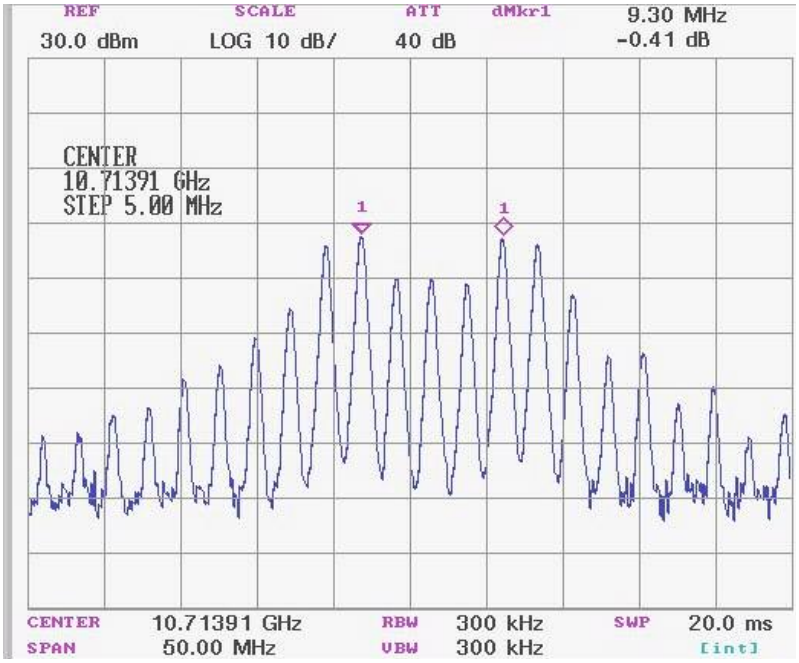


الشكل (12) الحامل الترددي

❖ **التأكد من عرض المجال الترددي:**

قِيسَ طيف الحامل للمركب الترددي مع تعديل بإشارة معدلة ترددها 10MHz نحو لتمثيل إشارة الصورة، وحصلنا على النتائج المبينة في الشكل (13) الذي يظهر أن الحلقة مقفلة والحامل يعدل ترددياً ضمن مجال 9.3MHz ودون تشويه حيث $\Delta MK_1 = 9.3MHZ$.

تم التحقق من صحة عمل المركب الترددي بإجراء اختبار ميداني تم فيه نقل إشارة صورة كاميرا في الزمن الحقيقي.



الشكل (13) الحامل الترددي بعد تطبيق إشارة التعديل

6. الاستنتاجات:

❖ إجراء دراسة نظرية لحلقة الإقفال الطوري مع المعدل الترددي ، وربط معاملاتها بعناصر الدارة المكافئة.

❖ تصميم مركب ترددي مع معدل عريض المجال يقبل إشارة الصورة الحقيقية

❖ تنفيذ دارة المركب عملياً وقد أكدت الاختبارات المخبرية والميدانية صحة عمـــل المعدل.

المراجع

[1] S. Grimmett, "Frequency Modulation in a Phase Lock Loop by Control of the Phase Inside the Loop", *RF Design*, June 1991, pp 31-38.

[2] F. Dacus, "Design and Optimization of Frequency Modulated Phase Locked Loops", *RF Design*, March 1992, pp 114-119.

[3] M. da Silva, "Synthesis of FM Signals", RF Design, Sep./Oct. 1984, pp 29-38.

[4] Jouko Vanka, "Digital Sythesizers and Transmiter" Copyright © 1999 by LLH Technology Publishing. Printed in the United States of America Second Edition 2005

[5] Data Sheet HMC513lp5 Hittite Microwave Corporation

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2008/12/31.