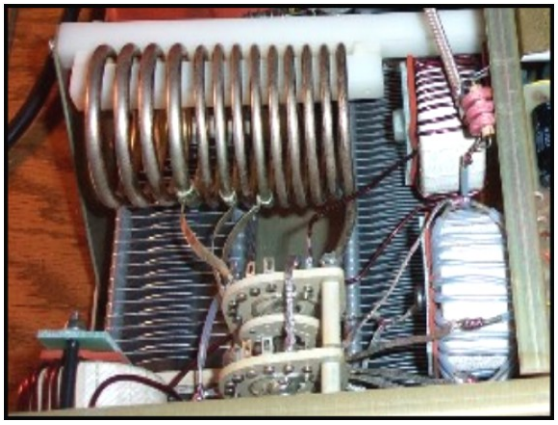
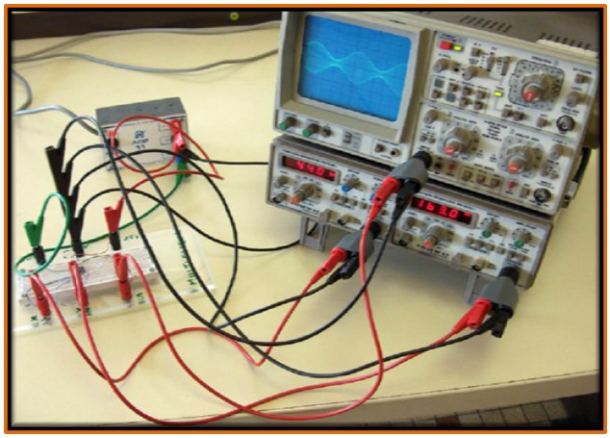
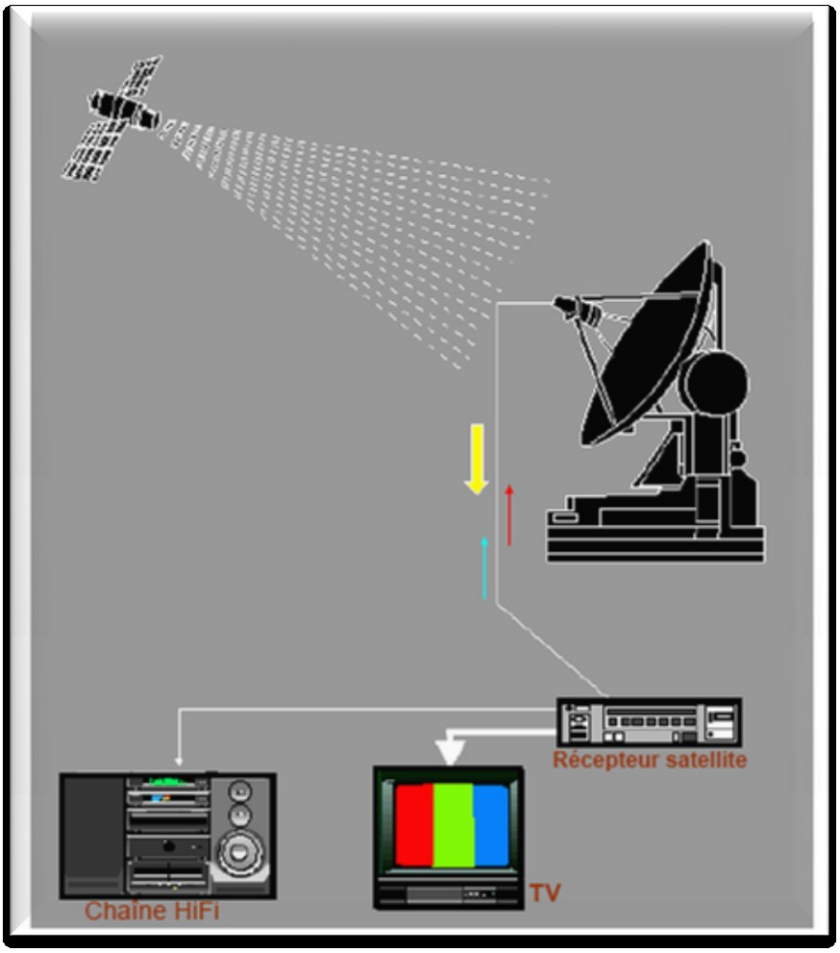
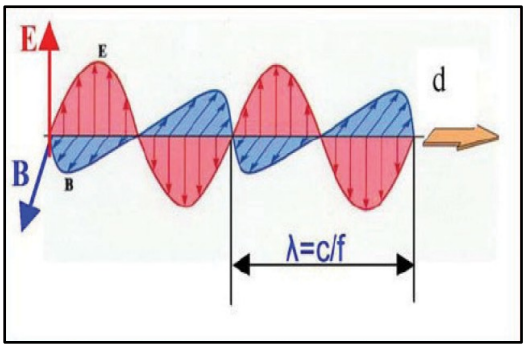
الموجات الكهرمغنطيسية
نقل المعلومات ـ تضمين الوسع







تعد الموجات الكهرمغنطيسية أحد أهم الاكتشافات العلمية في العصر الحديث ، بواسطتها يتم انتقال المعلومات ، الأخبار ، الموسيقى و الحوارات من و إلى جميع مناطق العالم .
فهناك عدة أجهزة تعتمد في اشتغالها على هذا النوع من الموجات : محطات إذاعية ، أجهزة التلفيزيون ، الهواتف النقالة ، أجهزة الاتصالات الفضائية .....
فكيف تعمل هذه الملايين من الموجات غير المرئية و المنتشرة حول العالم ، بدون أن يحدث تداخل أو تشويش لبعضها البعض ؟



1) الموجات الكهرمغنطيسية .

1 - 1) تعريف و مميزات .

تتكون الموجة الكهرمغنطيسية من مجال كهربائي $\vec{E}$ و مجال مغنطيسي $\vec{B}$ متعامدين فيما بينهما و مع اتجاه انتشارهما .

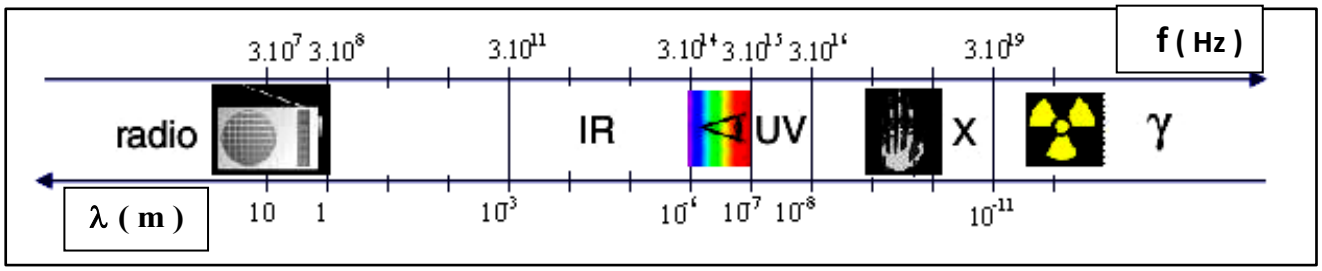
ـ تنتشر في الفراغ بسرعة $c = 3.10^8 m.s^{-1}$ ، و هي موجات دورية تتميز بدور T و بتردد f و بطول موجة λ :

$$\lambda = c.T$$

ـ موجات مستعرضة تخضع للخصائص الموجية كاالحيود ، التداخل ، الانكسار و الانعكاس .

، قدرة الموجة الكهرمغنطيسية تتعلق بوسع الموجة ، ترددها و العوامل الجوية .

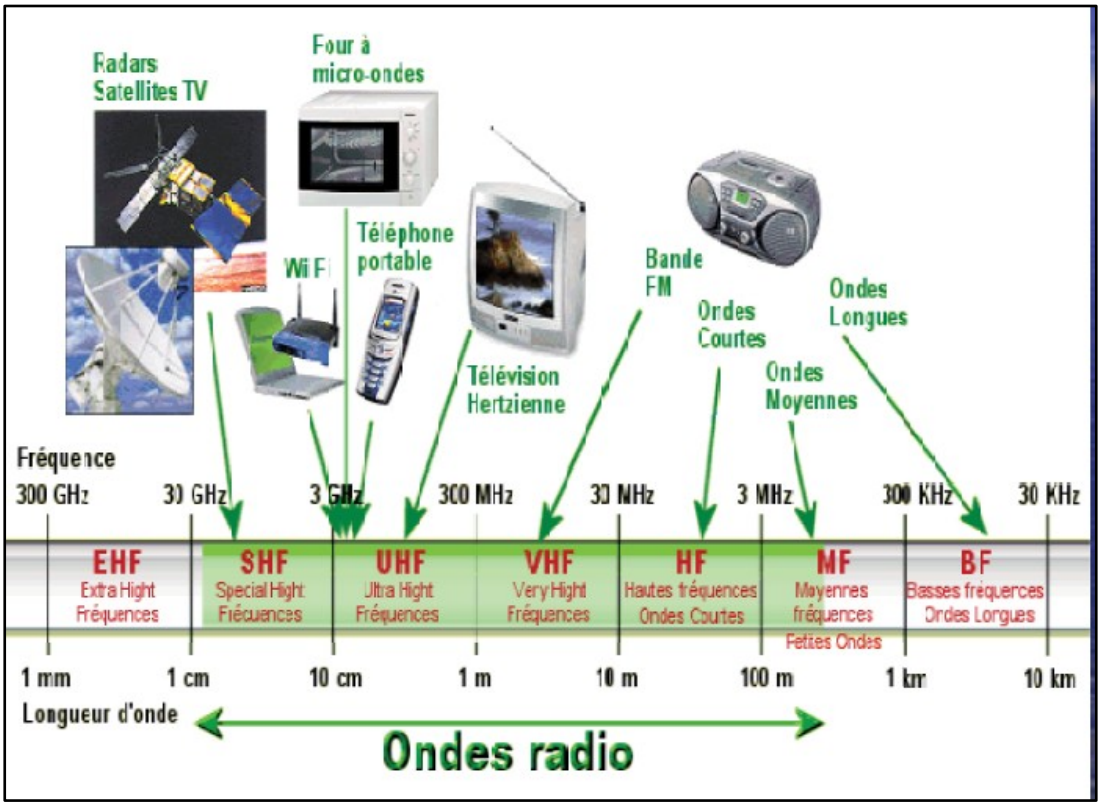
طيف الموجات الكهرمغنطيسية



1 - 2) الموجات الهرتزية .

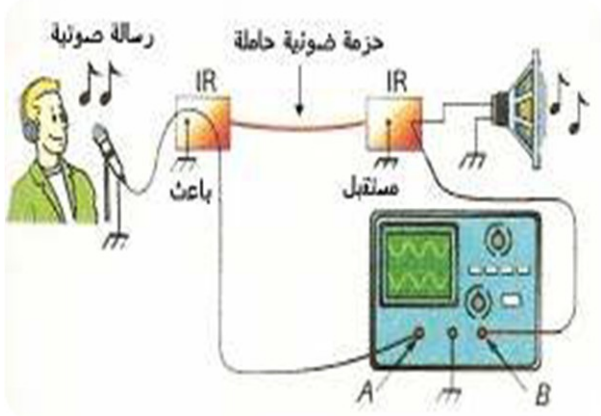
موجات كهرمغنطيسية طول موجتها في الفراغ أكبر أو تساوي 1mm ، تستعمل في نقل المعلومات في مجال الاتصالات اللاسلكية و البث الإذاعي و التلفزي .....

و تستعمل الموجات الهرتزية ذات التردد المرتفع في حمل (نقل) الإشارات ذات ترددات منخفضة باعتماد عملية التضمين .



2) إرسال و استقبال موجة كهرمغنطيسية .

2 - 1) نقل إشارة صوتية



ننجز التركيب التجريبي جانبه ونصدر صوتا لآلة موسيقية أمام الميكروفون ونسمع الصوت من مكبر الصوت .
نعوض الميكروفون بمولد التردد المنخفض GBF ضبط على توتر متناوب جيبي تردده مسموع وقيمته 440Hz .
نعاين على شاشة راسم التذبذب الإشارتين ؛ المنبعثة من جهاز GBF والمستقبلة من طرف مكبر الصوت .
الصوت المحدث أمام الميكروفون هو المعلومة المراد إرسالها .

الميكروفون يحول الرسالة الصوتية إلى إشارة كهربائية (توتر كهربائي)
مكبر الصوت يستقبل الإشارة الكهربائية ويحولها إلى إشارة صوتية أي الرسالة الصوتية .
ما دور الليف البصري ؟
موجه الحزمة الضوئية (guide) أي أن الحزمة الضوئية الحاملة للإشارة الكهربائية تنتشر داخله

نسمي الحزمة الضوئية بالموجة الحاملة Onde porteuse فهي تتغير حسب الإشارة المراد نقلها ، نقول أن الحزمة الضوئية مضمَّنة Modulé .

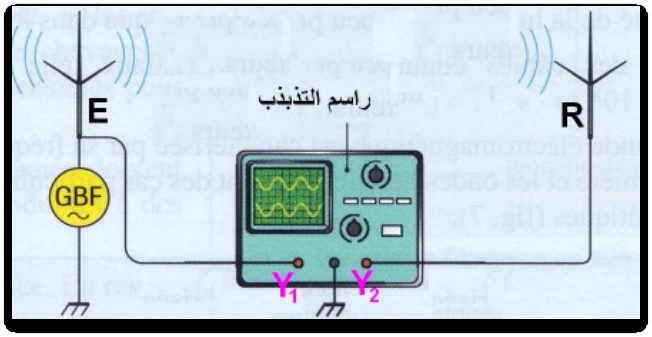
قارن بين شكلي ودوري ووسعي الإشارة المنبعثة من GBF والإشارة التي يستقبلها مكبر الصوت
من خلال الشكل يلاحظ أن لهما نفس الدور ونفس الوسع
الموجة الحاملة موجة جيبية ترددها عالي محصور بين 100KHz و 10GHz
رتبة قدر سرعة انتشارها هي $2.10^8 m/s$ وهي تقارب سرعة الضوء في الفراغ .
ما الإشارة المضمَّنة ؟ وما الإشارة المضمِّنة ؟
الإشارة المضمِّنة ، الإشارة الكهربائية المراد إرسالها : **المعلومة** ذات تردد منخفض من 20Hz إلى 20KHz .
الإشارة المضمَّنة ، الحزمة الضوئية : **الموجة الحاملة**
أعط تعريفا لعملية التضمين .

عندما تغير الإشارة إحدى مميزات الموجة الحاملة (الوسع أو التردد) تسمى هذه العملية بالتضمين

ملحوظة : يمكن للموجة الحاملة أن تكون موجة ضوئية أو موجة هيرتيزية (الراديو ، الهاتف المحمول إلخ .....)
عند الاستقبال يجب فصل الإشارة (المعلومة) عن الموجة الحاملة تسمى هذه العملية بإزالة التضمين .

2 - 2) إرسال واستقبال موجة كهرمغنطيسية

ننجز التركيب التجريبي الممثل جانبه .
نغذي السلك الكهربائي E بواسطة مولد التردد المنخفض GBF ضبط على توتر جيبي وسعه $U_m=5V$ وتردده f=20kHz .
نعاين على شاشة راسم التذبذب التوتر بين مربطي GBF والتوتر الذي يستقبله السلك الكهربائي R .



ما دور كل من السلكين الكهربائيين E و R ؟
ـ السلك الكهربائي E : دور الهوائي الباعث
ـ السلك الكهربائي R : دور الهوائي المستقبل
قارن بين التوترين المشاهدين على شاشة راسم التذبذب .
ماذا تستنتج ؟
لهما نفس الوسع ونفس التردد نستنتج أنه تم الحفاظ على نفس المميزات التي تحملها الإشارة المراد إرسالها .
ما طبيعة الموجة المنتشرة بين السلكين E و R ؟ وما سرعة انتشارها ؟
طبيعة الموجة : موجة كهرمغنطيسية . سرعتها تساوي سرعة الضوء في الفراغ $C = 3.18^8 m/s$
هل هناك انتقال للمادة بين E و R ؟
ليس هناك انتقال المادة بين الهوائيين ، بل انتقال الطاقة بواسطة الموجة الكهرمغنطيسية .

خلاصة :

ـ تنقل المعلومة بواسطة موجة كهرمغنطيسية في الغلاف الجوي مادة أو الفراغ بدون انتقال للمادة وإنما بانتقال الطاقة .
ـ يستقبل الهوائي الباعث E إشارة كهربائية ، ويبعث موجة كهرمغنطيسية للموجة الكهرمغنطيسية المرسلة من الهوائي الباعث نفس تردد الإشارة التي يستقبلها .
ـ للموجة الكهرمغنطيسية الواردة على الهوائي المستقبل و الإشارة الكهربائية الناتجة عنها نفس التردد .

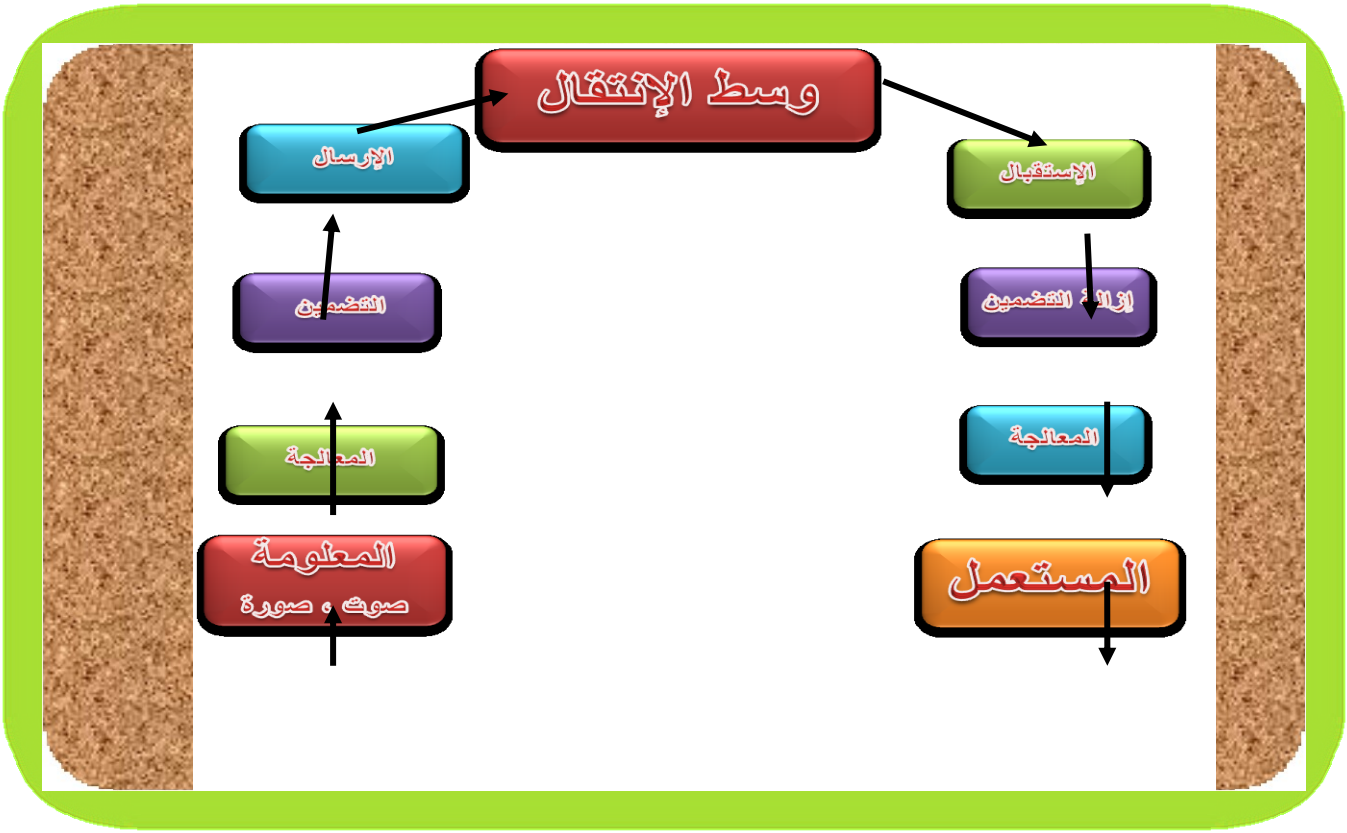
2 - 3) صعوبات تعترض نقل معلومة .

المعلومة المنقولة : صوت ، صورة ، بيانات كتابية ..... ترددتها منخفضة تقريبا من **20Hz** إلى **20kHz**
و بذلك فإنها تتأثر بالخواص الفيزيائية و الكهربائية لوسط الانتقال (امتصاص ، تبدد ، تداخل ، تشويش .....)
فينتج عن هذا خمود الموجات .

من جهة أخرى يسهل اعتراضها و التصنت عليها ، كما أنها تتطلب هوائيات ذات أبعاد كبيرة $L = \frac{\lambda}{2}$.

لتجاوز هذه الصعوبات نلتجأ إلى عملية التضمين
و ذلك باعتماد موجة حاملة ذات تردد عال

2 - 4) خطاطة لانتقال المعلومات .



3) تضمين موجة جيبية.

3 - 1) مبدأ التضمين .

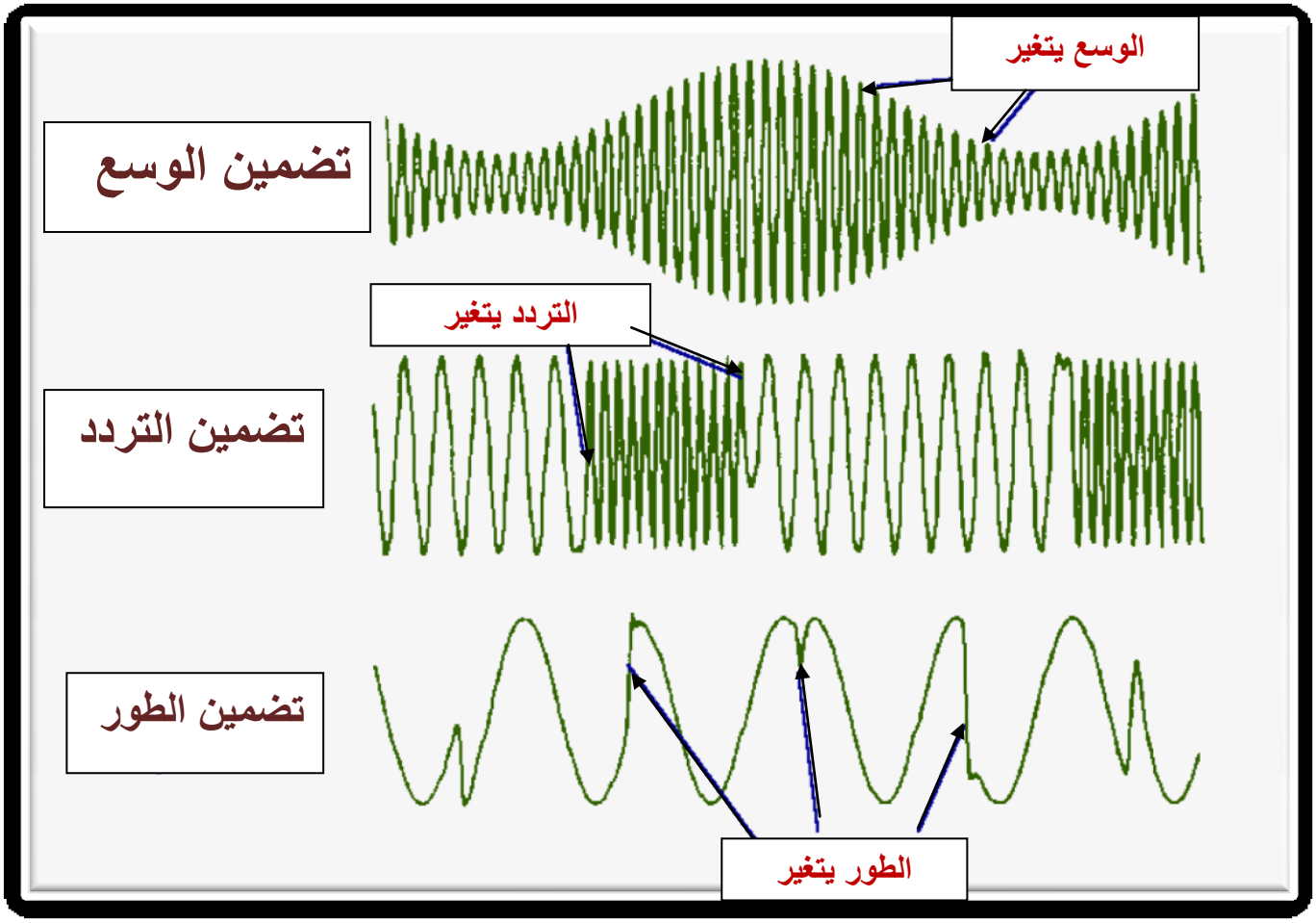
تسمى الموجة الكهرمغنطيسية التي تنقل معلومة **بالموجة الحاملة** . أما المعلومة فتسمى بالإشارة **المضمِّنة**.
تتمثل تقنية التضمين في جعل الإشارة المضمِّنة (المعلومة) تغير أحد المقادير المميز للموجة الحاملة أي تغيير وسعها ، ترددها أو طورها بدلالة الزمن .

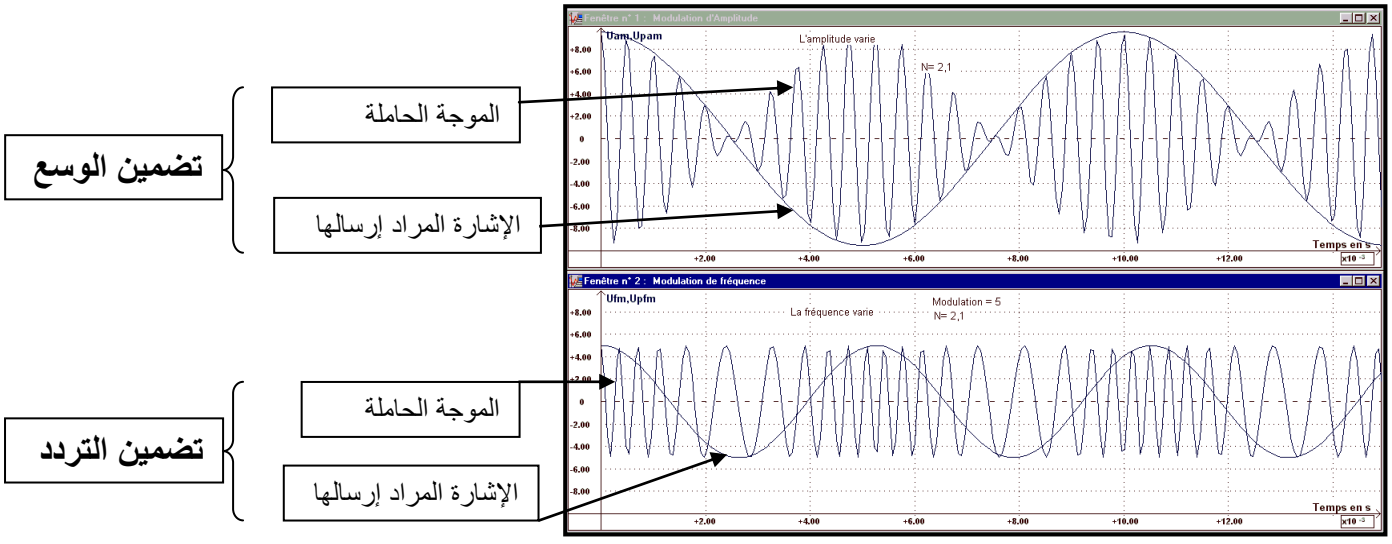
3 - 2) تضمين توتر جيبي .

التعبير العام لموجة جيبية هو : $u(t) = U_m \cos(2\pi Ft + \varphi)$

لتسجيل معلومة على هذه الموجة الحاملة ، يمكن أن نغير :

- وسعها U_m بدلالة المعلومة المراد إرسالها (تضمين الوسع AM ، BLU أو SSB .....)
- ترددها F بدلالة المعلومة المراد إرسالها (تضمين التردد FM ، FSK ، GMSK .....)
- طورها φ بدلالة المعلومة المراد إرسالها (تضمين الطور PM ، PSK .....)





4) تضمين الوسع .

4 - 1) مبدأ تضمين الوسع .

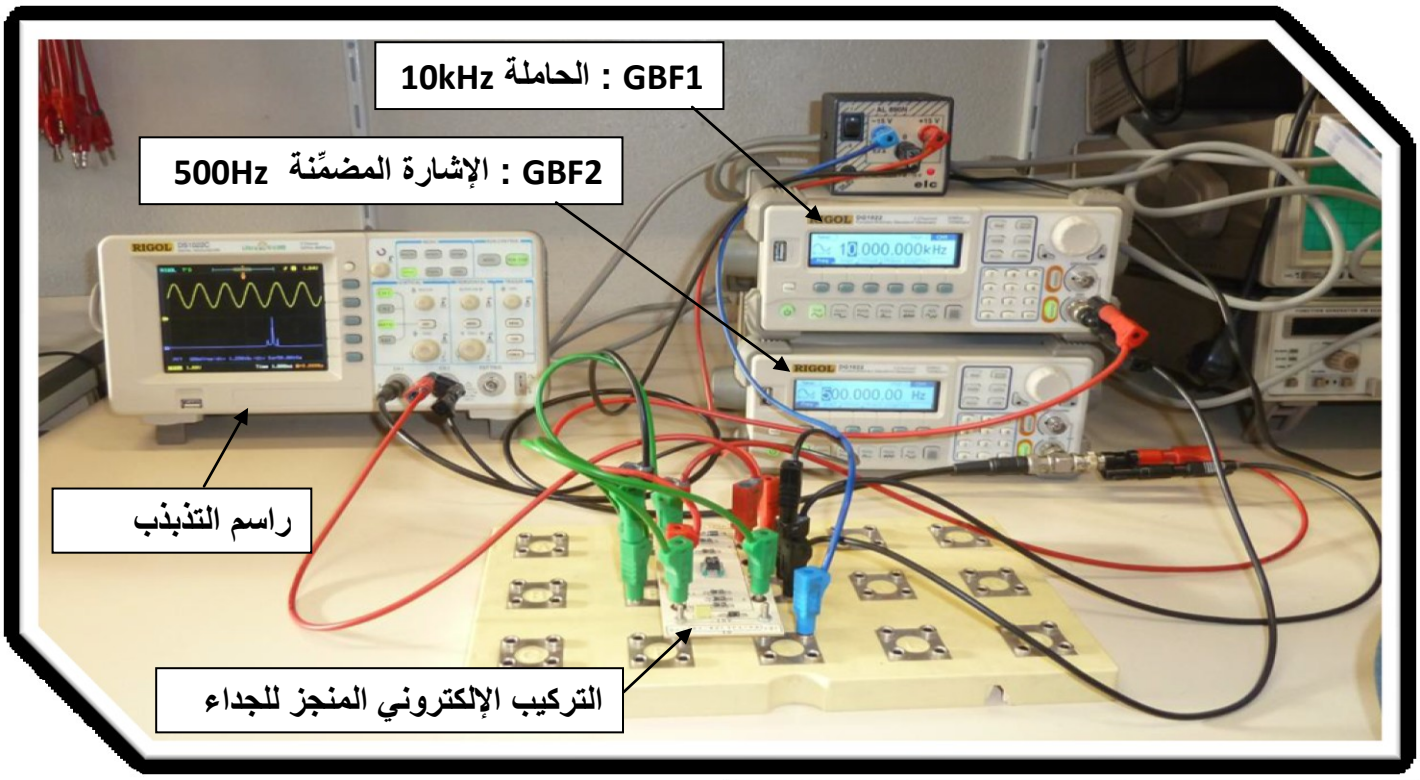
نحصل على تضمين الوسع بإنجاز جداء توترين :

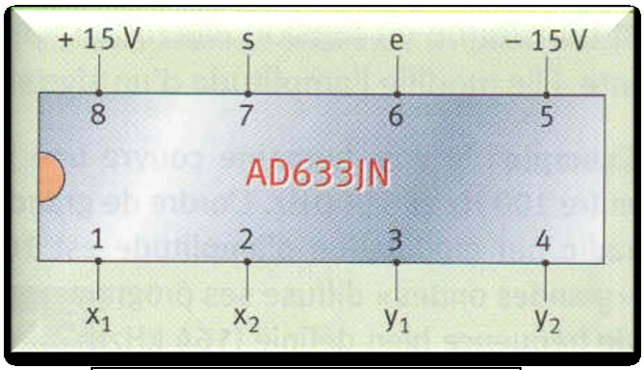
- توتر جيبي تردده عال (الموافق للموجة الحاملة) : $u_p(t) = P_m \cos(2\pi Ft)$
- توتر يساوي مجموع توتر جيبي منخفض التردد $u_s(t)$ (الموافق للإشارة المضمِّنة) و توتر مستمر U_0 يسمى توتر الإزاحة أو المركبة المستمرة : $u_s(t) + U_0 = S_m \cos(2\pi ft) + U_0$

حيث نستعمل تركيبا إلكترونيا منجزا للجداء للحصول على توتر مضمَّن يتناسب مع هذا الجداء :

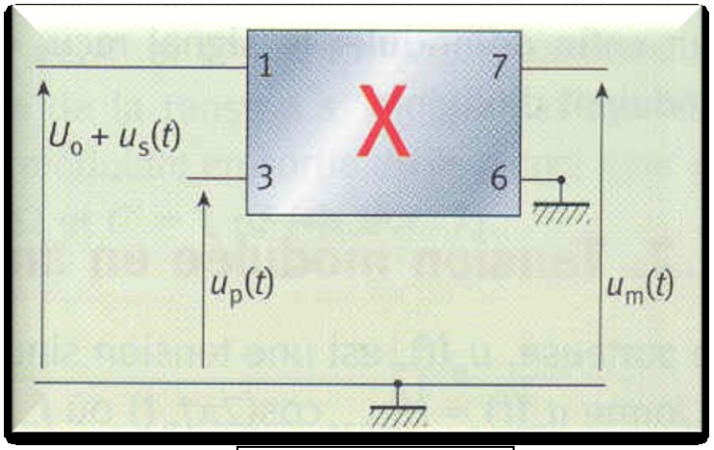
$$u_m(t) = k.u_p(t).(u_s(t) + U_0)$$

معامل التناسب k يميز الدارة المنجزة للجداء **AD633** .

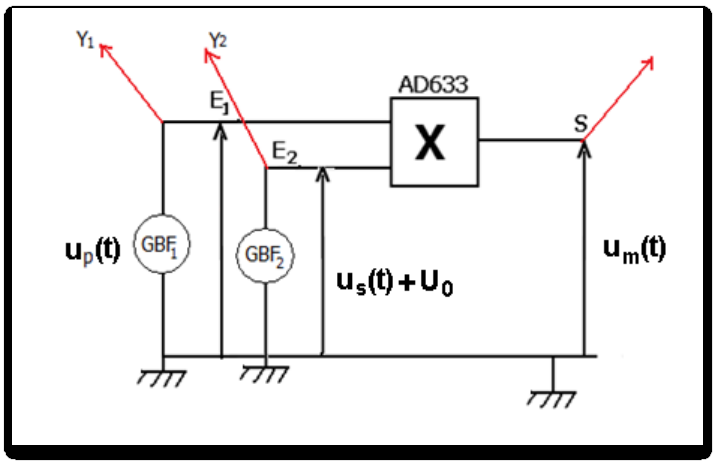




الدارة المتكاملة المنجزة للجداء



التركيب التجريبي



4 - 2) الإبراز التجريبي .

ننجز التركيب التجريبي جانبه حيث :

الحساسية الرأسية في المدخل Y1 2V/div

الحساسية الرأسية في المدخل Y2 1V/div

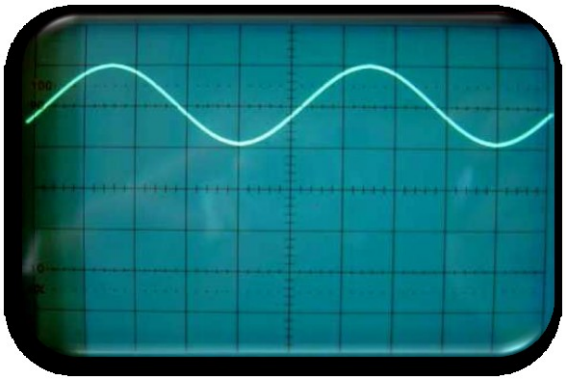
يطبق مولد GBF_2 في المدخل E_2 التوتر $u_s(t)+U_0$:

$u_s(t)$ إشارة جيبية وسعها S_m=1V وترددها $f=500Hz$

U_0 توتر مستمر ضبط بواسطة GBF_2 على القيمة

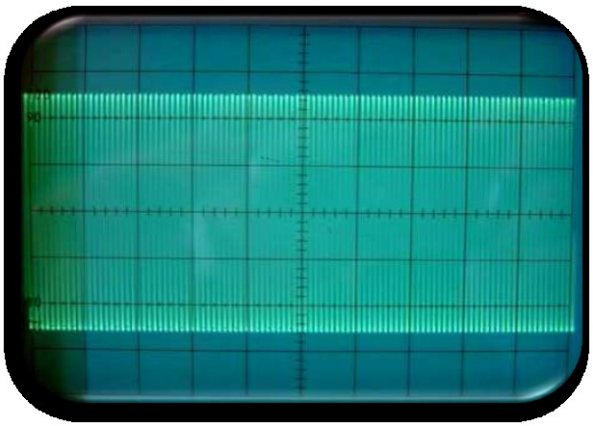
$U_0 = 2V > S_m$

نعاين على شاشة راسم التذبذب في المدخل Y_2 التوتر $u_s(t)+U_0$ فنحصل على الرسم التذبذبي التالي :

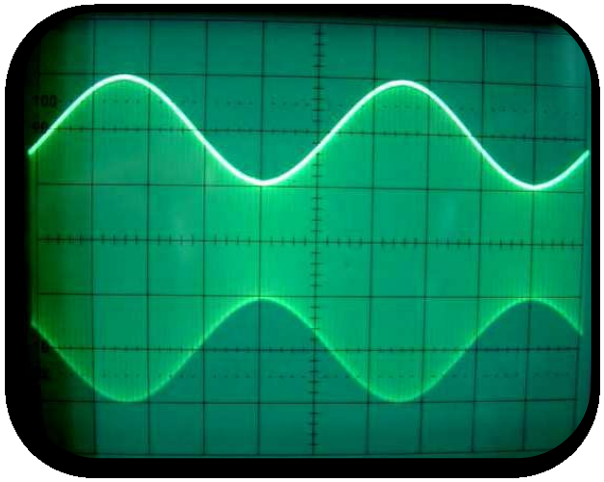


نطبق في المدخل E_1 ، بواسطة GBF_1 توتر جيبي $u_p(t)$ وسعه P_m=5V وتردده $F=10kHz$ حيث $F > 10f$

نعاين $u_p(t)$ في المدخل Y_1 لراسم التذبذب فنحصل على الشكل التالي :



بعد ذلك نعاين على شاشة راسم التذبذب توتر الخروج $u_m(t)$ فنحصل على الشكل :



خلاصة .

التوتر $u_m(t)$ المحصل عليه عند مخرج الدارة المتكاملة المنجزة للجداء توتر **مضمَّن الوسع** .

غلاف التوتر $u_m(t)$ يتبع تغيرات الإشارة التي تضم المعلومة $u_s(t)$.

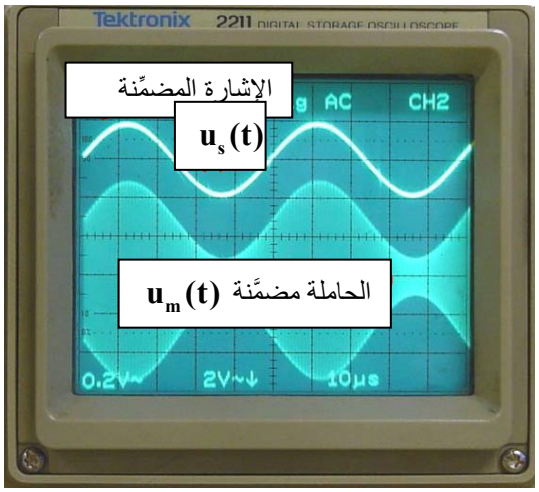
التوتر $u_m(t)$ توتر مضمَّن والإشارة $u_s(t)$ توتر مضمِّن .

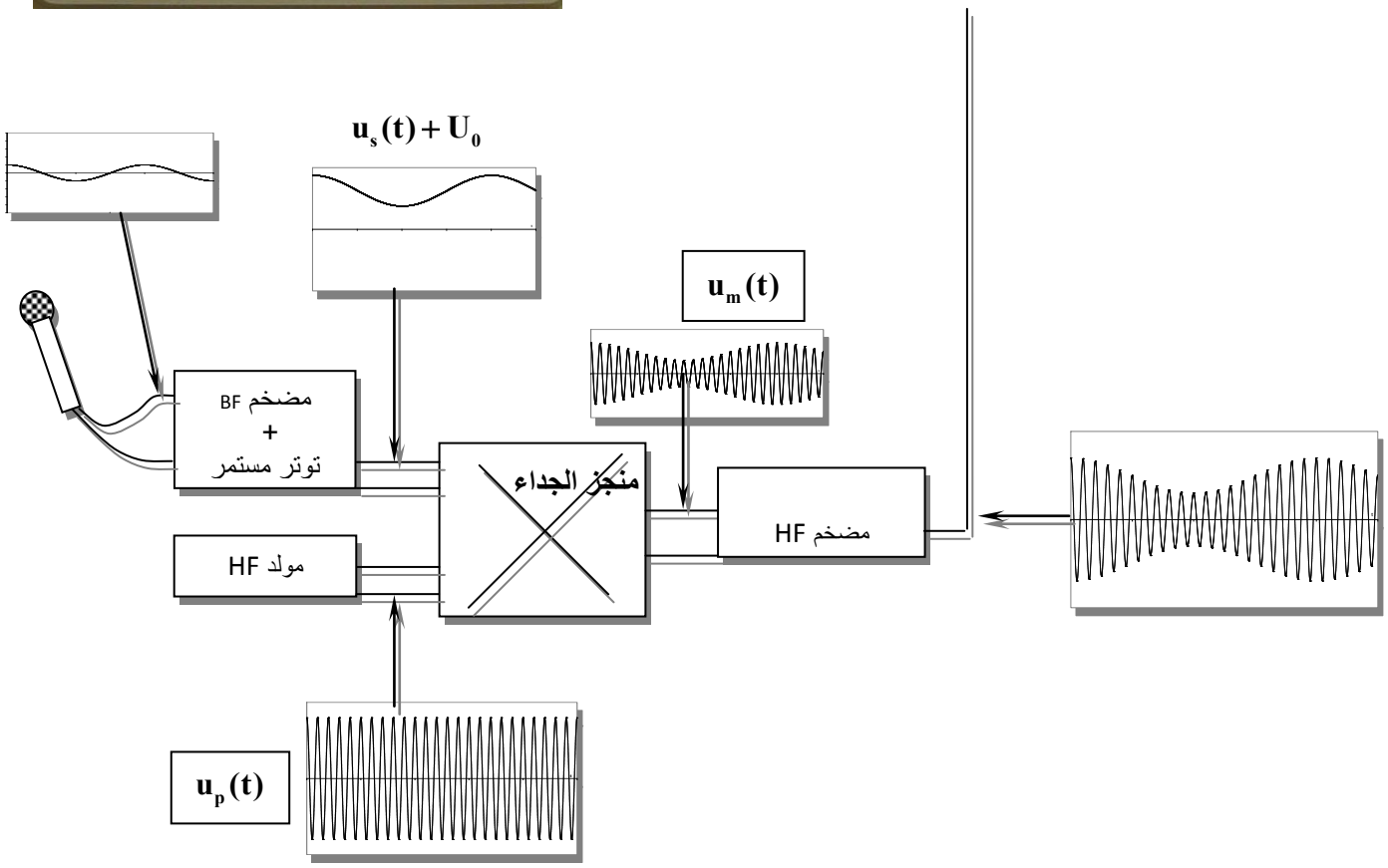
التوتر المحصَّل عند مخرج الدارة المتكاملة المنجزة للجداء ،

توتر مضمَّن الوسع .

يضمِّن التوتر ذو التردد المنخفض وسع التوتر ذا التردد العالي

والذي يسمى التوتر الحامل .





3 - 4) تعبير توتر مضمَّن الوسع

عند المدخل E_2 للدارة المنجزة للجداء، لدينا $u_s(t)+U_0$ مع U_0 المركبة المستمرة و $u_s(t) = S_m \cos(2\pi ft)$.

والتوتر المطبق عند المدخل E_1 هو : $u_p(t) = P_m \cos(2\pi Ft)$

عند المخرج S لدينا التوتر : $u_m(t) = k.u_p(t).(u_s(t)+U_0)$

$$u_m(t) = k \times P_m \times (u_s(t)+U_0).\cos(2\pi Ft)$$

التعبير العام لتوتر مضمَّن الوسع هو :

$$u_m(t) = U_m(t).\cos(2\pi F_P t)$$

$$U_m(t) = k \times P_m \times (u_s(t)+U_0)$$

نضع $a = k.P_m$ و $b = k.P_m.U_0$ فيصبح تعبير الوسع هو $U_m(t) = a.u_s(t)+b$ و هو عبارة عن دالة تآلفية للتوتر المضمِّن $u_s(t)$. و $U_m(t)$ الوسع المضمَّن أي أنه يعيد تغيرات $u_s(t)$.

4 - 4) حالة توتر مضمّن جيبي .

نعتبر أن التوتر المضمّن دالة جيبية على الشكل التالي : $u_s(t) = S_m \cos(2\pi ft)$

يصبح الوسع المضمَّن هو :

$$U_m(t) = k.P_m \times \left(S_m \cos(2\pi ft) + U_0\right) \quad \Rightarrow \quad U_m(t) = k.P_m.U_0\left(\left(\frac{S_m}{U_0}\right)\cos(2\pi ft) + 1\right)$$

نضع $A = k.P_m U_0$ و $m = S_m / U_0$ فتصبح العلاقة على الشكل التالي :

$$U_m(t) = A\left(m\cos(2\pi ft) + 1\right)$$

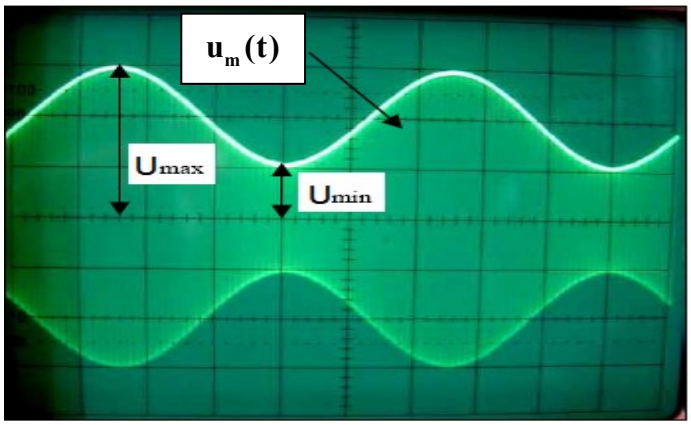
نسمي m نسبة التضمين (le taux de modulation)

من خلال العلاقة يتبين أن الوسع المضمَّن يتغير بين قيمتين :

$Cos(2\pi f.t) = +1$ أي أن $U_{mmax} = A(m+1)$

$Cos(2\pi f.t) = -1$ أي أن $U_{mmin} = A(1- m)$ و بالتالي نعبر عن نسبة التضمين بدلالة $U_{m\,max}$ و $U_{m\,min}$ بالعلاقة التالية :

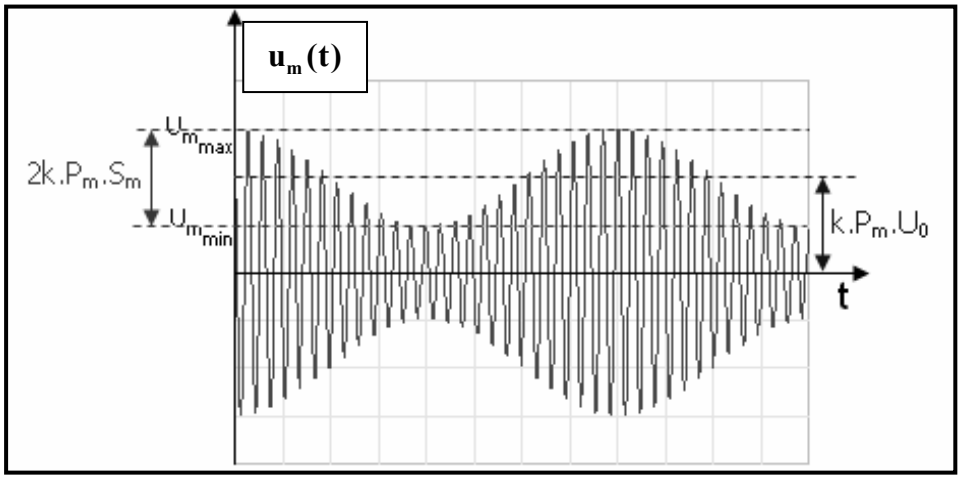
$$m = \frac{U_{m\ max} - U_{m\ min}}{U_{m\ max} + U_{m\ min}}$$



مثلا من خلال المنحنى التالي نحسب نسبة التضمين

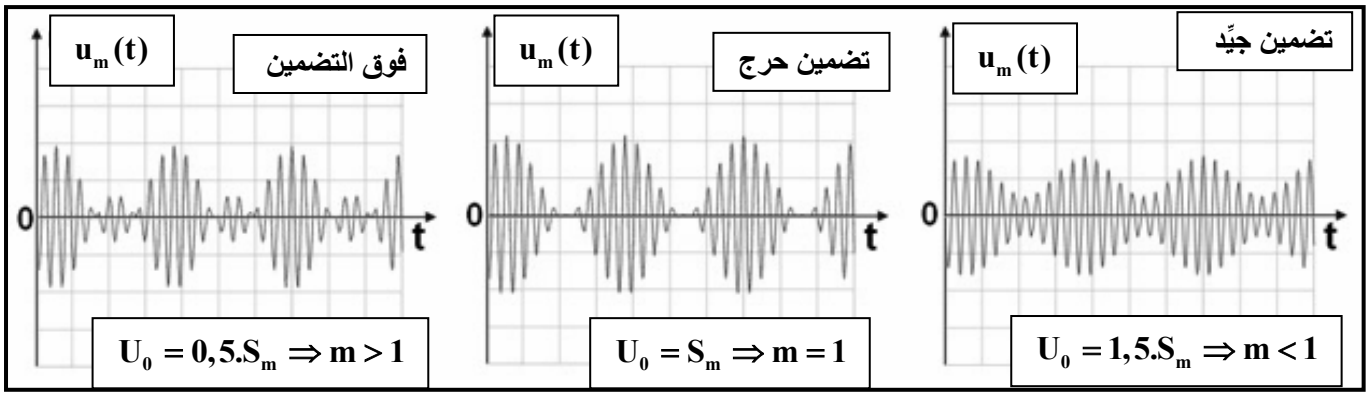
نعطي : الحساسية الرأسية هي 2V/div

$$m = \frac{U_{m\ max} - U_{m\ min}}{U_{m\ max} + U_{m\ min}} = \frac{6-2}{6+2} = 0,5$$

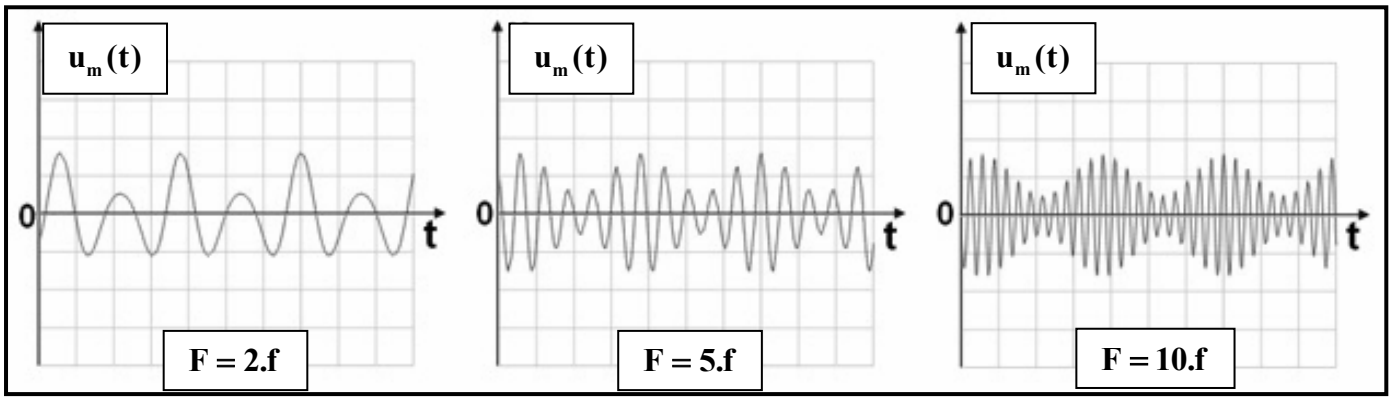


4 - 5) جودة التضمين .

- **تأثير المركبة المستمرة U_0 .**



- **تأثير تردد الموجة الحاملة F .**



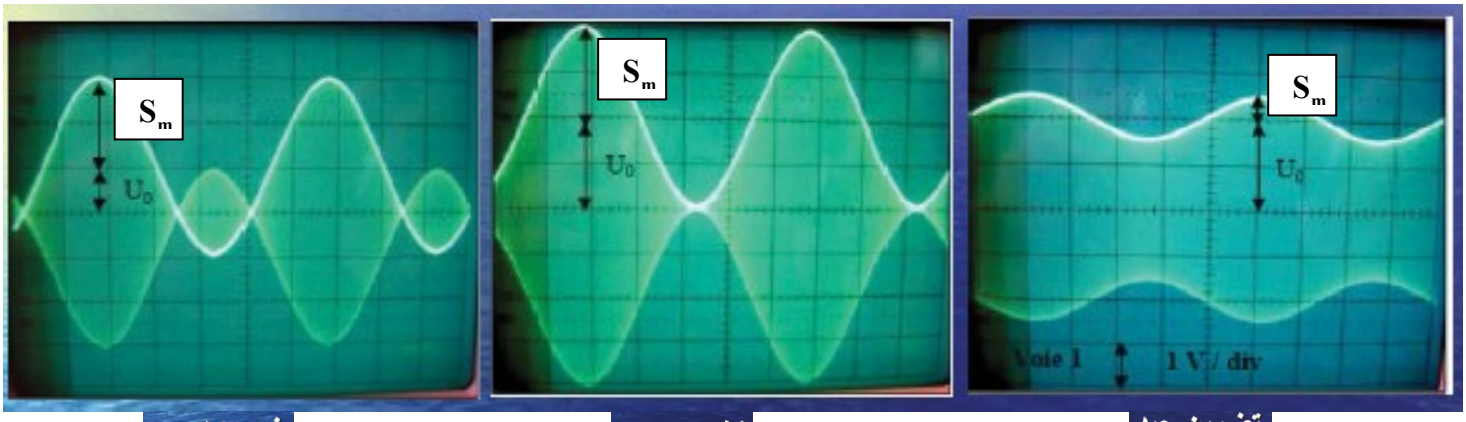
مع f تردد الإشارة المضمِّنة .

نستنتج أن جودة التضمين تتحقق بتحقق الشرطين التاليين :

- ✓ $m < 1$ أي $S_m < U_0$
- ✓ $F \gg$ أو $F \geq 10f$

في الحالات الأخرى التضمين يكون رديئا :

- ✓ $m > 1$ أي $S_m > U_0$ نقول بأن هناك فوق التضمين
- ✓ $m = 1$ أي $S_m = U_0$ نقول بأن لدينا تضمين حرج



للتحقق من جودة التضمين تجريبيا نستعمل طريقة شبه المنحرف :

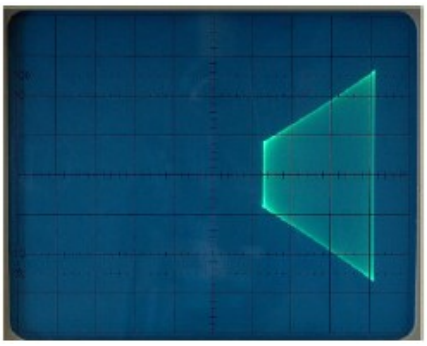
نستعمل راسم التذبذب في النظام XY أي في غياب الكسح

ثم نعاين تغيرات التوتر المضمَّن بدلالة التوتر المضمِّن $u_m = f(u_s + U_0)$

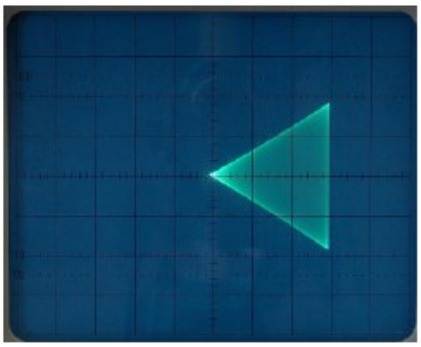
نصل الإشارة المعلومة + المركبة المستمرة بالمدخل X

و نصل توتر الخروج من الدارة المنجزة للجداء بالمدخل Y

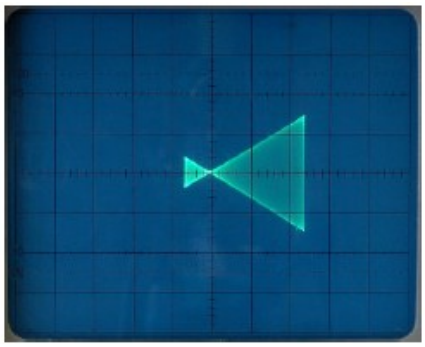
ثم باستعمال الزر XY نعاين $u_m = f(u_s + U_0)$



m<1 تضمين جيِّد

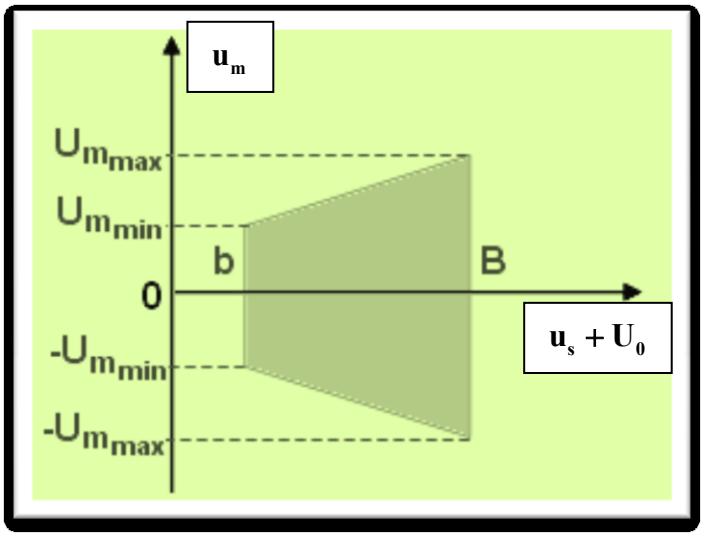


m=1 تضمين حرج



m>1 فوق التضمين

يمكن تحديد نسبة التضمين m انطلاقا من أبعاد شبه المنحرف :



$$m = \frac{B - b}{B + b}$$

4 - 6) طيف الترددات AM .

يكتب تعبير التوتر المضمَّن على الشكل : $u_m(t) = k.P_m(u_s(t) + U_0)\cos(2\pi F.t)$ حيث $u_s(t)$ توتر الإشارة المراد نقلها

بتعويض $u_s(t) = S_m \cos(2\pi f.t)$ في المعادلة السابقة نحصل على : $u_m(t) = kP_m(S_m \cos(2\pi f.t) + U_0)\cos(2\pi F.t)$

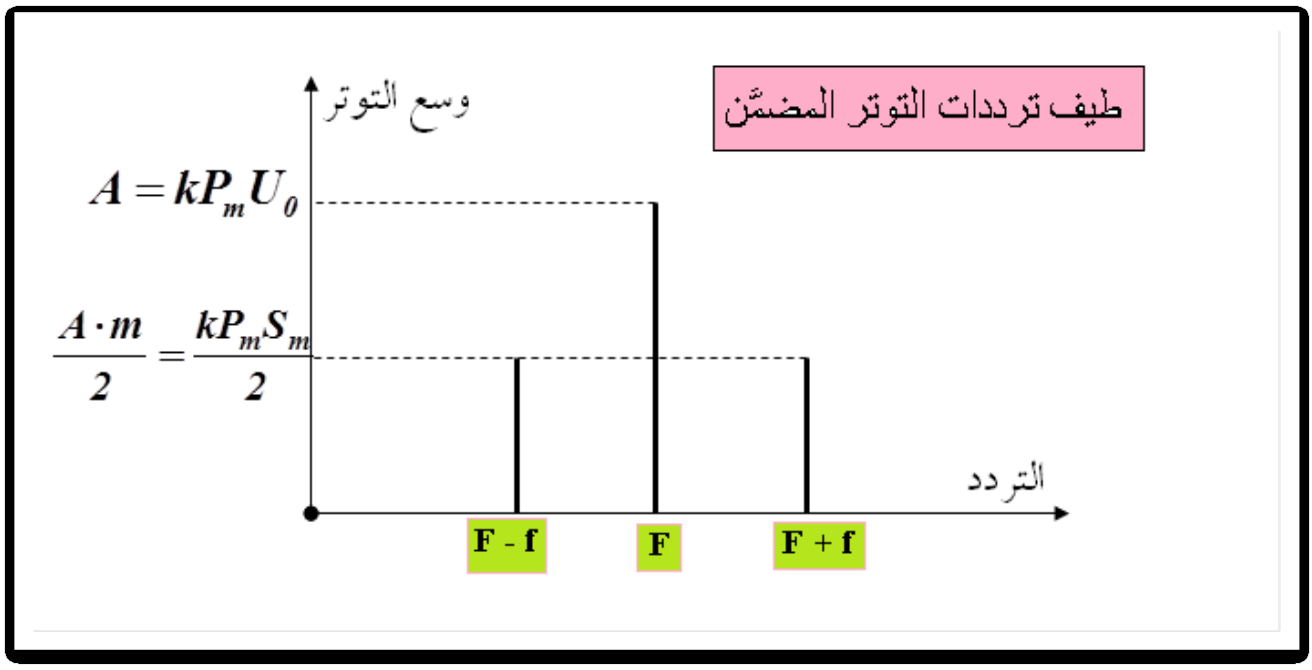
أي أن : $u_m(t) = kP_m S_m \cos(2\pi f.t).\cos(2\pi F.t) + kP_m U_0 \cos(2\pi F.t)$

نعلم أن : $\cos a.\cos b = \frac{1}{2}\left[\cos(a+b) + \cos(a-b)\right]$ و بالتالي تعبير التوتر المضمَّن هو :

$$u_m(t) = \frac{kP_m S_m}{2}\cos\left[2\pi(F-f)t\right] + \frac{kP_m S_m}{2}\cos\left[2\pi(F+f)t\right] + kP_m U_0 \cos(2\pi F.t)$$

نلاحظ أن التوتر المضمَّن هو مجموع ثلاثة توترات جيبية ترددا تها هي :

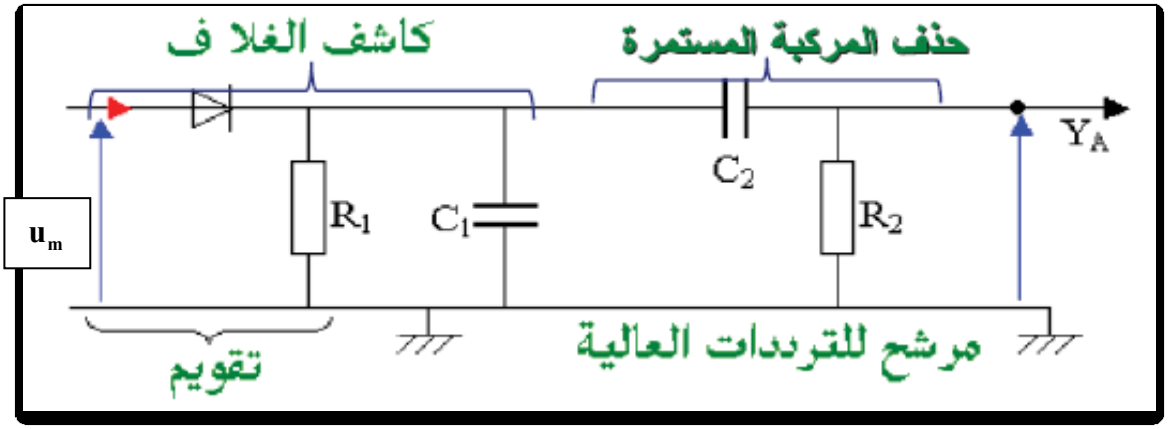
(F-f) F (F+f)



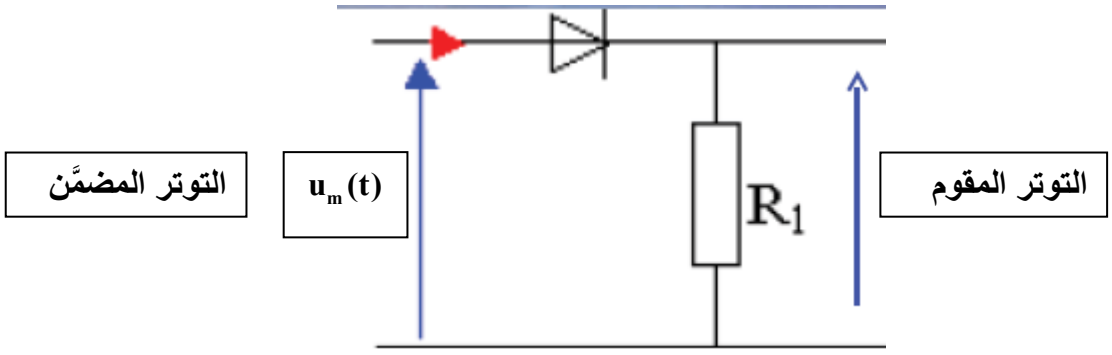
6) إزالة التضمين .

هو العملية العكسية للتضمين ، حيث يتم استرجاع المعلومة BF المبعوثة عبر الموجة المضمَّنة HF . و تتم عبر مرحلتين :

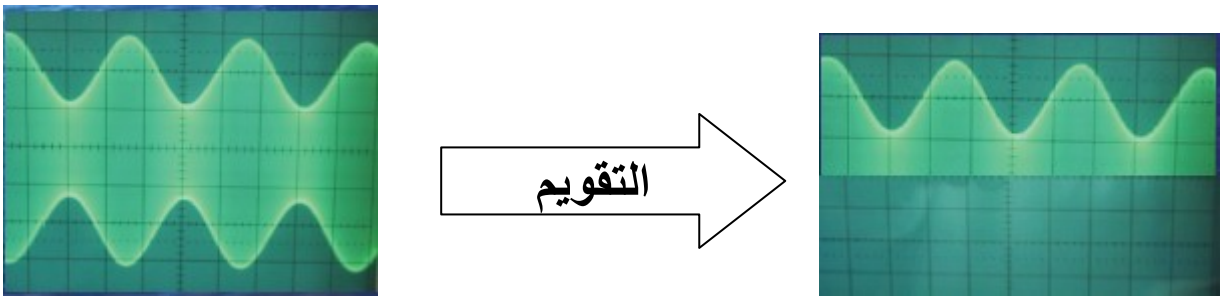
- كشف الغلاف : إزالة الموجة الحاملة $\mathbf{u_p(t)}$
- حذف المركبة المستمرة للتوتر $\mathbf{U_0}$



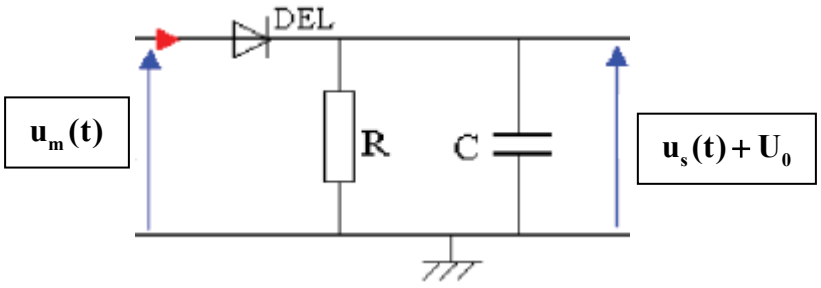
6 - 1) التقويم .



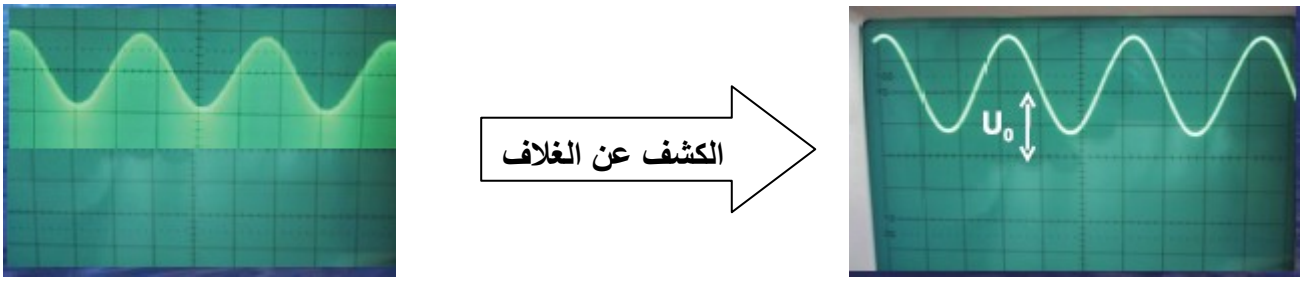
يعمل الصمام الثنائي على حذف الجزء السالب من التوتر المضمَّن



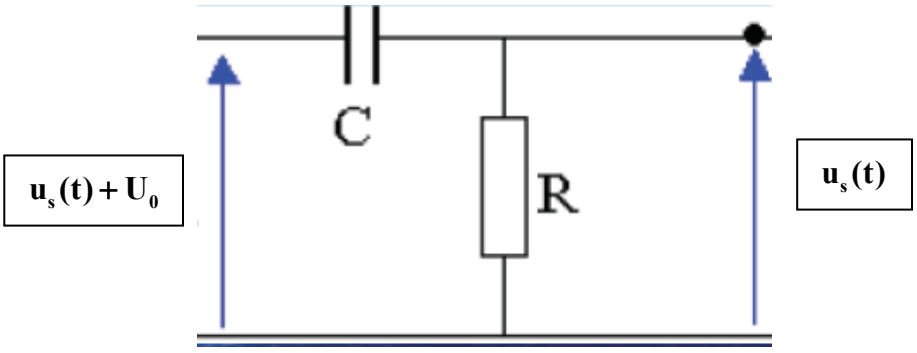
6 - 2) كاشف الغلاف .

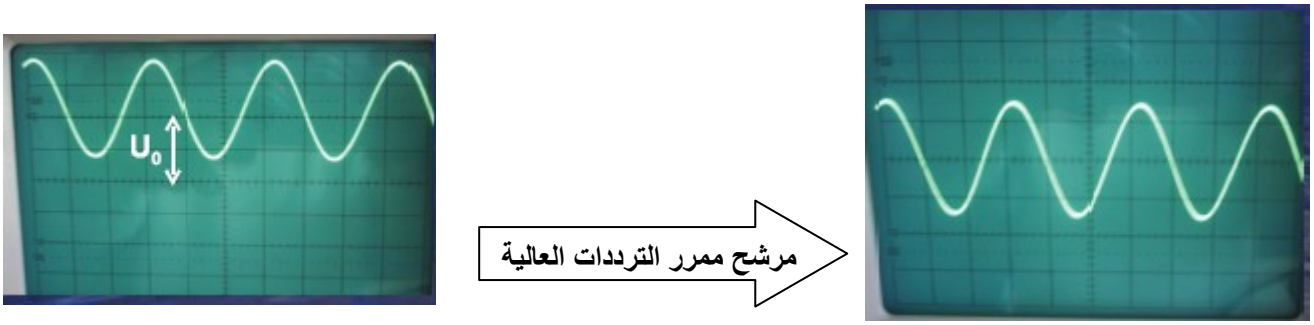


يحذف كاشف الغلاف التوتر الحامل ذو التردد العالي



6 - 3) حذف المركبة المستمرة : مرشح الترددات العالية .





6 - 4) شروط إزالة تضمين جيِّد .

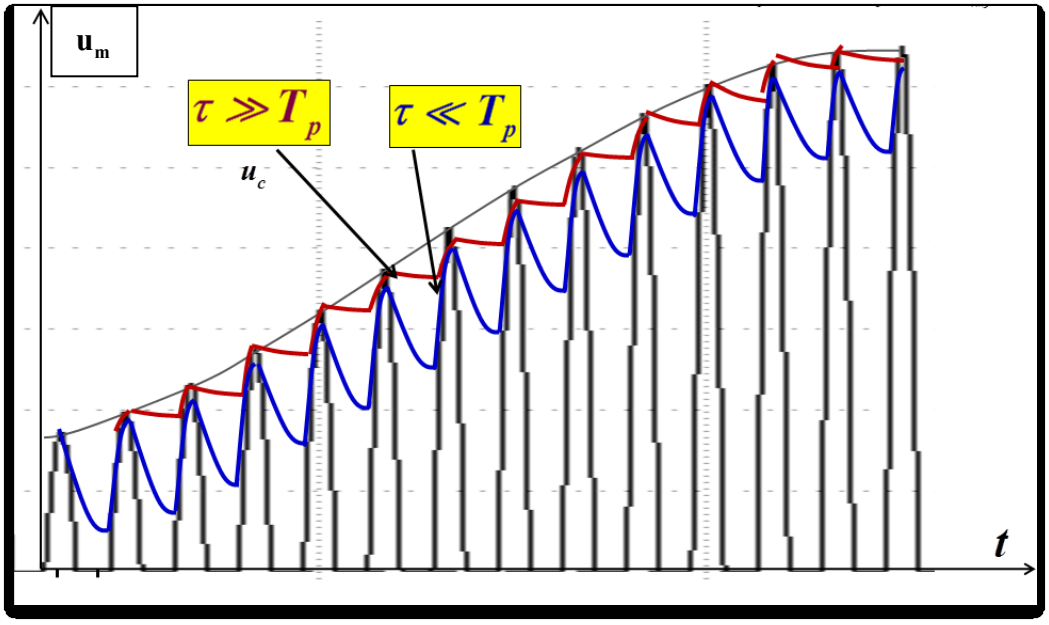
شروط الحصول على كشف غلاف جيد هي :

أن يكون التوتر في مخرج دارة كاشف الغلاف ذا تموجات صغيرة وتتبع بكيفية أحسن شكل الإشارة المضمِّنة .

ويتحقق هذا إذا كانت ثابتة الزمن $\tau = R.C$ تحقق المتراجحة التالية :

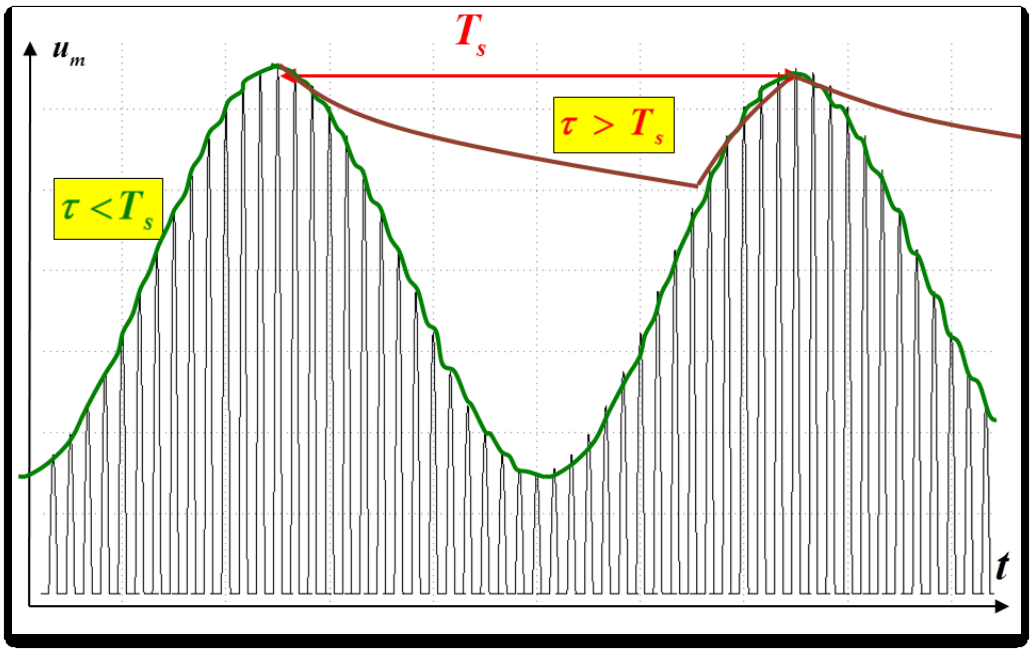
$$T_p << \tau < T_S \quad \text{أي أن} \quad f_s << \frac{1}{\tau} < F_P$$

- T_P دور التوتر الحامل و T_s دور الإشارة المضمَّنة .

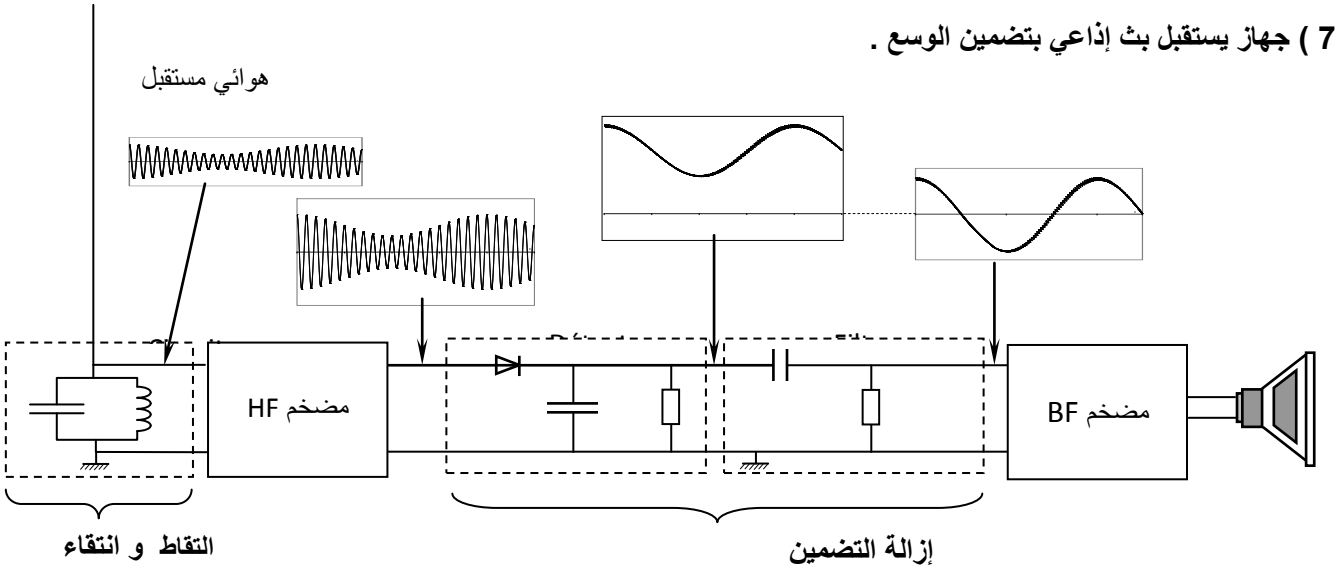


في حالة $\tau < T_s$ فإن التوتر في مخرج كاشف الغلاف يتبع غلاف الموجة المضمَّنة .

في حالة $\tau > T_s$ فإن التوتر عند مخرج كاشف الغلاف لا يتبع غلاف الموجة المضمَّنة .



7) جهاز يستقبل بث إذاعي بتضمين الوسع .



- يلتقط الهوائي الموجات الكهرمغنطيسية ، و يحدث تذبذبات كهربائية في الدارة LC . بهدف الاستماع لمحطة إذاعية معينة ، يلزم انتقاء هذه الموجات ، حيث نقوم بتغيير إما سعة المكثف أو قيمة معامل تحريض الوشيعة .
- تمرر الدارة LC الإشارات ذات الترددات التي تنتمي لمنطقة ممركزة حول التردد الخاص $\mathbf{f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$
- و بذلك فإن تردد الموجة الحاملة يجب أن يحقق العلاقة $\mathbf{F = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$ لكي يمر.

يتكون مستقبل راديو من :

- هوائي يستقبل الموجات الكهرمغنطيسية مختلفة الترددات
- دارة LC للانتقاء يمكن توفيقها على التردد $\mathbf{F}$ للموجة الحاملة الواردة من المحطة الإذاعية و ذلك بضبط قيمة L أو C
- مضخم الإشارات HF
- كاشف غلاف
- مرشح ممرر للترددات العالية لحذف المركبة المستمرة .
- مضخم الإشارات BF
- مكبر الصوت