A MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION RADIO-FREQUENCY PROTECTION RATIOS OF AUDIO STEREOPHONIC BROADCASTING SYSTEM USING THE SINGLE-SIDE BAND AMPLITUDE MODULATION

نموذج رياضي لحساب النسب الوقائية بالتردد اللاسلكي لنظام البث الإذاعي المجسم باستخدام تضمين الاتساع بنطاق جانبي مفرد

Ali Abdo Mohammed Al-Kubati
Faculty of Computer Science and Engineering, Hodeidah University, Hodeidah, Yemen
E-mail: Dr_aliabdo13@hotmail.com
Abdul Hadi A. A. Khader
Department of Mathematics, Sana'a University, Sana'a, Yemen
E-mail: aalim3_3@hotmail.com

ملخص

ان المعيار الرئيسي الذي يحدد تصميم نظام البث الإذاعي، والذي يؤمن الاستقبال مع الجودة المطلوبة، يعتبر بارامتر النسبة الوقائية بالتردد اللاسلكي. للحصول على تخطيط أمثل لمحطات البث الإذاعي المجسم (الإستريو) الذي يستخدم نظام تضمين السعة ذو النطاق الجانبي المفرد، فإنه من الضروري إيجاد النسبة الوقائية لنظام التضمين المشار إلية سابقا. ومن أجل ذلك فقد تم في هذا البحث إنشاء نموذجاً رياضا يتم بواسطته حساب النسبة الوقائية النسبية لنظام البث الإذاعي المجسم المذكور سابقا، ويتم ذلك بمحاكاة العمليات الفيزيائية لجهاز الإرسال و الإستقبال طبقا للطريقة الموضوعية للقياس، و إعتبار بأن جهاز الإرسال يمثل طيف الإشارة المجسمة المركبة و جهاز الإستقبال يمثل الإستجابة الترددية لقناه الإستقبال، علاوة على ذلك تم الحصول على النسب الوقائية لمختلف البارامترات ووجد بأنها تتفق تماما مع نتائج إختبارات الطريقة الشخصية لتقييم جودة الإستقبال. النتائج التي تم الحصول عليها من هذه الدراسة تتيح ليس فقط تحديد التباعد الترددي الضروري بين مرسلين معرضين لتأثير التداخل المتبادل، ولكن أيضا تحقيق الإستخدام الأمثل للطيف الترددي، حيث أن الجمع بين المباعدة الفضائية والترددية لإجهزة الإرسال وإستخدام مناطق الحد الأدنى للنسبة الوقائية النسبية في نطاق الإشارة المرغوبة يعطي إمكانية توفير مباعدة الترددات اقل من عرض النطاق الترددي للإشارة على مسافة كافيه لإجهزة الإرسال وبالتالي يتم تحسين جودة الاستقبال. و حيث أن هذة الدراسة هي الأولى من نوعها في الجمهورية اليمنية فإن نتائجها يجب ان تؤخذ كقاعدة معلوماتية لدراسات مشابهة مستقبلا.

كلمات مفتاحية: الإشارة المجسمة المركبة، تضمين السعة بنطاق جانبي مفرد، النسبة الوقائية النسبية، التعزيز السابق، التعزيز اللاحق، المباعدة الترددية.

Abstract

The main criterion that determines the design of radio broadcasting system, which provides the reception with the required quality, is considered a parameter of ratio-frequency protection ratio. In order to get the optimal planning of the stereophonic radio broadcasting stations (stereo) that uses a single side-band amplitude-modulation (SSB-AM), it is necessary to find the protection ratio of the modulation system that we are indicated to it previously. Therefore, in this paper deals with design of a mathematical model to Calculate the relative protection ratio of the stereophonic radio broadcasting system mentioned previously, this is done by simulation of physical processes of the transmitter and receiver according to the objective method of measurement, hence, we considering that the transmitter is a spectrum of complex stereophonic signal and the receiver is the frequency response of channel reception. Furthermore, we get the calculated protection ratios by this model for various parameters that are agree well with the results of subjective assessment tests for estimation of the quality of reception. The results obtained from this study allows not only determine the necessary frequency Spacing between transmitters are exposed to the effect of mutual interference, but also achieve the optimal use of the frequency spectrum, whereas, the combined with a space and frequency spacing of the transmitters and the use of zones of the minimum rate of relative proportion ratio within the wanted signal band gives the possibility of providing frequency spacing is less than the bandwidth of the signal at a sufficient distance to the transmitters and this tends to improve the quality of reception. Whereas, this study is the first of its type in the Republic of Yemen and its results should be taken as an information base for similar studies in the future.

1. المقدمة (Introduction):

في اليمن نطاق الترددات العالية جداً (VHF) مخصص للبث الإذاعي، في الوقت الحالي تستخدم أنظمة تعمل على نظام تضمين التردد (Frequency Modulation-FM)، و لهذه الأنظمة تم تخصيص النطاقين الفرعيين (Subband): 66 ... 74 MHz و 100...108MHz. البث الإذاعي في النطاق الفرعي الأول يستخدم في الجمهورية اليمنية منذو سنوات عديده، أضف إلى ذلك في السنوات الأخيره يظهر المزيد من الإهتمام بالبث الإذاعي المجسم (الإستريو) (Stereophonic Broadcasting). شبكة برامج الإستريو تتوسع بإستمرار. إرسال الأشارة المجسمة عند البث الإذاعي في اليمن يتم بإستخدام نظام التضمين القطبي (Polar-Modulation). للحصول على إشارة تضمين قطبي يستخدم تردد إشارة الحامل الفرعي (Sub-carrier Frequency) ذات التضمين الإضافي بالسعة، الواقع في طيف الإشارة المجسمة المركبة (Complex Stereophonic Signal-CSS) [1, 2, 3]. أغلب الدول تستخدم النظام الإمريكي للبث الإذاعي المجسم مع النغمة الدليلية (Pilot-Tone) في النطاق الترددي الفرعي الثان 100... 108 MHz. نظام البث الإذاعي الذي يستخدم تضمين التردد، كما هو معروف، يحتل نطاق عريض (Wide-Band)، الذي يزيد عن التردد العلوي للإشارة المضمنة بما لايقل عن الضعف. بالمقارنة مع نظام البث الإذاعي الذي يستخدم تضمين التردد والبث الإذاعي الرقمي (Digital Audio Broadcasting-DAB)، تنظيم البث الإذاعي في نطاق الترددات العاليه جداً مع إستخدام تضمين السعة بنطاق جانبي مفرد (Single Side-Band Amplitude Modulation-SSB-AM) يسمح بتخفيض النطاق الذي تحتله الإشارة المضمنة Modulated (Signal) إلى نطاق إشارة التضمين (Modulating Signal) ذات التردد المنخفض. بالإضافه إلى ذلك، يبسط إلى حد كبير معالجة الإشارة عند الإستقبال و لهذه الأسباب، كما هو موضح في [4, 5, 6, 7, 8]، SSB-AM عند البث الإذاعي المجسم في نطاق VHF، في المستقبل القريب ستنافس البث الإذاعي FM والبث الإذاعي الرقمي (DAB). ولكن عند إستعمال SSB-AM على عكس البث الإذاعي FM والبث الإذاعي الرقمي (DAB) تظهر مشكلة خطية الإستجابة السعوية للمرسل (Linearity of Amplitude Characteristic). هذه المشكله في الوقت الحالي تحل بنجاح عن طريق إستخدام وحدة إخطاط (Linearizer) وما يسمى بطريقة إيقاف التراجع (Back-off) في مرسلات خطوط الترحيل الرقمي اللاسلكي (Digital Radio Relay Links) ذات التسلسل الرقمي المتزامن (Synchronous Digital Hierarchy) مع التضمينين المتعامد للسعة متعدد المستويات (M-ary Quadrature Amplitude Modulation- M-QAM). عند QAM على مخرج الكاشف يتغير طور و إتساع الإشارة [9, 10].

هنا نشير إلى أن، عند إستخدام نظام التضمين SSB-AM يتم الحصول على كفاءة عالية للطيف الترددي، مقارنة بالأنظمة التي تستخدم تضمين التردد. ويتحقق هذا نتيجة إنجاز متطلبات صارمة لخطية الإستجابة السعوية للمرسل، عند إستجابات التضمين البيني

المقبول، الذي يتحقق باستخدام وحدة إخطاط، استناداً إلى طريقة الإسترجاع العكسي للتعزيز السابق (De-emphasis) [11].

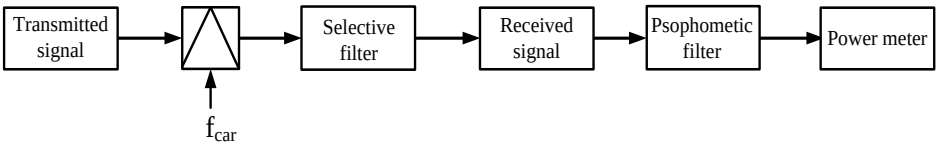
بالإضافه إلى ذلك، في الوقت الراهن ظهرت تصاميم لإجهزة إرسال و إستقبال تستخدام نظام التضمين SSB-AM في نطاق الترددات العاليه جداً [12, 13, 14]. للتخطيط الأمثل (Optimal Planning) لشبكة البث الإذاعي التى تتطور بإستمرار يجب الأخذ بعين الإعتبار تأثيرات أجهزة إرسال المحطات المجاورة على جودة إستقبال البرامج الإذاعية. بث البرامج الإذاعية المشتركة مع تأمين إستقبال جيد، نظرا لتقليص التأثير من جانب محطات الإرسال اللاسلكي الإخرى، المعروف بالتوافق الكهرومغناطيسي للإذاعة اللاسلكية (Electromagnetic Compatibility–EMC).

النسبة الوقائية بالتردد اللاسلكي (Radio-Frequency Protection Ratio) تسمى الحد الأدنى المسموح به للنسبة بين قدرة الإشارة المرغوبه (Wanted Signal) و قدرة إشارة الضجيج عند خطأ الموالفه الترددية المحدد الذي يؤمن إستقبال برنامج البث الإذاعي مع جودة محدده، الجودة المطلوبة للاستقبال يحددها صنف المستقبل (Class of Receiver). وبالتالي، لتحقيق إمكانية التخطيط الأمثل لمحطات البث الإذاعي التي تستخدام نظام تضمين السعة بنطاق جانبي مفرد، من الضروري إيجاد النسبة الوقائية لنظام التضمين المشار إليه. لحل هذه المشكله الموضوعه يجب الحصول على نموذج رياضي Mathematical (Model)، يحدد علاقة تغلغل الضجيج (Noise) من محطات البث الإذاعي المجاوره، من خلال مباعدة الترددات التي ينبغي أن تأخذ بعين الإعتبار كلاً من الخصائص التقنية لجهاز الإرسال والإستقبال، و الحساسية الفعلية (Real Sensitivity) للأذن البشرية لمختلف المركبات الطيفية للضجيج.

2. التقييم الموضوعي للنسبه الوقائية (The Objective Estimation of the Protection Ratio):

تتواجد على الأقل طريقتين لإيجاد النسبة الوقائية هما: الطريقة الشخصية (Subjective Method)والطريقة الموضوعية (Objective Method). الطريقة الشخصية لتقييم جودة الاستقبال (Quality of Reception) تجرى بواسطه مجموعة من المستمعين (Group of Audience) وبالتالي، فهي مرتبطة بالإدراك الشخصي. التقييم الموضوعي يمكن إجراءه عند طريق قياس قدرة الإشارة المرغوبة وقدرة الضجيج باستعمال مرشح قياس الضوضاء الموزون (Psophometric Weighting Filter). النسبة الوقائية هي عبارة عن داله رياضيه مرتبطه بخطأ موالفة الترددات ΔF بين ترددات حوامل الإشارة المرغوبة و إشارة التداخل (Interfering Signal). لأنواع التضمين المعقدة، على سبيل المثال، تضمين التردد، بالتناوب قياس قدرة الإشارة المرغوبة و قدرة إشارة التداخل لا يعطي تقييم دقيق لتأثيرات الضجيج، لإنه عند إستخدام تضمين التردد فإن تأثير الضجيج يتوقف على تواجد الإشار المرغوبة. هذا يعني أن الضجيج يؤدي إلى ظهورإنحراف ترددي طفيلي (Parasitic Frequency Deviation) [1, 2, 3]. وفقاً لذلك فالطريقه الموضوعية للقياس لحد ما تصبح اكثر تعقيدا. عند إستعمال تضمين السعة، قياس قدرات

الإشارة المرغوبة و إشارة التداخل يمكن إجراءها بالتناوب، بقياس كل قيمه بواسطه مقياس وزن القدرة. المخطط الصندوقي للقياس مبين في الشكل (1).



الشكل (1): المخطط الصندوقي لقياس النسبة الوقائية

نظام القياس كالتالي: عندما يكون تردد إشارة الحامل (Carrier Frequency- f_{car}) مطابق لتردد قناة الاستقبال يقاس مستوى الاشارة المرغوبة. في هده الحالة كل الطيف الفاعل لإشارة المرسل تصل الى مخرج المستقبل. مرشح قياس الضوضاء (Psophometric Filter) يأخذ في الاعتبار حساسيه الأذن البشرية لمختلف الترددات. وبعد ذلك عند تردد الحامل المزاح الى ΔF بالنسبة لقناة الإستقبال يتم قياس القدرة على المخرج الذي يطابق في هذه الحالة قدرة اشارة الضجيج. نسبه قدرة الضجيج الى قدرة الاشارة تعطي القيمه النسبية للنسبة الوقائية (Relative Protection Ratio -A_{rel}). النسبة الوقائية النسبية تظهر كم مرة توهن القدرة النافذة الى مخرج المستقبل عند إزاحه تردد الحامل في المرسل عن التردد المركزي للإستقبال. وبإعطاء معيار لنسبة الإشارة الى الضجيج المطلوبه والموزون على مخرج المستقبل، التي تطابق جودة الاستماع المطلوبة، يمكن حساب النسبة الوقائية على المدخل.

$$A_p = A_{rel} + A_{p.req}, [dB] \qquad (1)$$

حيث أن:

A_p – النسبة الوقائيه عند مدخل جهاز الإستقبال، التي ينبغي ان تكون محققه للجوده المطلوبه للإرسال عند خطأ الموالفة الترددية المحدده، معبر عنها بـ dB.

A_{rel} – النسبة الوقائية النسبية عند مدخل جهاز الإستقبال، عند خطأ الموالفة الترددية المحدده، معبر عنها بـ dB.

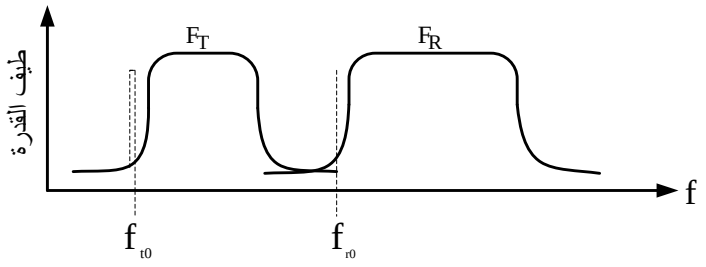
$A_{p.req}$ - النسبة الوقائية المطلوبة – هي نسبة قدرة الإشارة الى الضجيج عند مدخل جهاز الإستقبال، عند خطأ الموالفه الترددية الصغرى $\Delta F = 0$ المطابقة للجوده المطلوبة للإستماع، معبر عنها بـ dB.

عند إجراء التحاليل المختبرية بالطريقة المشار اليها ، إشعاع جهازالإرسال يحاكي جهاز الإرسال المعملي، المضبوط على تردد الإشارة الحاملة f_{car} و $f_{car}+\Delta f$ للإشارة والضجيج على التوالي. ترددات الحوامل المضمنة بواسطة ضجيج جاوؤس الموزون (Weighted Gaussian Noise). في [18] تم وصف طريقة إجراء القياسات الموضوعية لنظام تضمين السعة بنطاق جانبي مفرد الذي يستعمل في الاتصالات المتنقلة (Mobile Communications). العيب الأساسي للقياسات المعملية بالطريقة المشار اليها يعتبر صعوبة إستعمالها بسبب العدد الكبير للأنواع البديلة للبارامترات المحتملة لجهاز الإرسال وجهاز الإستقبال. في هذه الحالة الإسلوب الوحيد للتخطيط يعتبر حل المسالة بواسطة إنشاء

نموذجها الرياضي، الذي نتائجه تعتبر حساب دالة النسبة الوقائية. هذا الحل يمكن إنجازه في بيئة المثكاد (Mathcad Profesional) و الذي يستخدام الطرق العددية (Numerical Methods).

3. إنشاء النموذج الرياضي (Building of the Mathematical Model):

كي تحسب النسبة الوقائية باستعمال الطراز الرياضي يتم محاكاة (simulation) العملية الفيزيائية على اساس الطريقة الموضوعية للقياس. لنفترض أن المرسل على مخرجة إشارة إرسال مع بعض طيف الطاقة F_T (Energy spectrum) شكل (2)، طيف الإشارة يقع في جهة واحده من التردد الحامل عند إستعمال النطاق الجانبي المفرد (SSB). في هذه الحالة طيف الإشارة ذات التردد العالي (HF) يطابق بقايا الإشارة الحاملة المُخمدة (المكبُوته) جزئياً f_{t0} (Partially Suppressed Carrier) وطيف الإشارة ذات التردد المنخفض (LF) تم نقله بمحور التردد إلى الأعلى بمقدار f_{t0}. $F_T(f)$ -عبارة عن دالة متوقفة على التردد f. النموذج الرياضي للمستقبل $F_R(f)$ يعتبر هو الاستجابة الترددية ذو السعة (Amplitude Frequency Response) لقناة الاستقبال. وهكذا ، ضرب الاستجابات المشار اليها أعلاه ستعطي طيف الإشارة على مخرج المستقبل. عمليه ازالة تضمين (Detection) ذبذبة SSB-AM يمكن نمذجتها عن طريق نقل طيف الإشارة بمحور التردد إلى الأسفل. لهذا لكي نحصل على عبارة عامة لإستجابة المرسل في هذا النموذج يتم نقل طيف إستجابات كل المرشحات المستخدمة في المستقبل ومرشح قياس الضوضاء بمحور التردد الى الاعلى بمقدار f_{r0}. لتبسيط النموذج الرياضي سنستخدم محور افتراضي للتردد (Virtual Axis) $f' = f - f_{r0}$. لذا، كل الإستجابات التي سنستخدمها فيما بعد لوصف النموذج، سوف تكون متمركزة بالنسبة لتردد إشارة الحامل في جهة الإستقبال. لهذا النسبة الوقائية الناتجة تأخذ بعين الإعتبار الإدراك الشخصي لإشارة التداخل، دالة F_R يجب أن تتضمن إستجابة قياس الضوضاء.



شكل (2): مظهر التوزيع الطيفي لقدرة إشارة المرسل والإستجابة الترددية للمستقبل

قدرة الإشارة التي خاصية التوزيع الطيفي لكثافة قدرتها معلومة (Spectral Distribution of the Power Density)، يمكن الحصول عليها على النحو التالي:

$$P_S = \int_{-\infty}^{\infty} F_T{}^2(f)df \qquad (2)$$

وبالتالي، فإن قدرة الإشارة عند مخرج جهاز الإستقبال الموالف على قناة تختلف بالتردد عن ذبذبة الإشارة الحاملة للقناة المرغوبة من F_r إلى Δf هي:

$$P_S(\Delta F)) = \int_{f_1}^{f_2} F_T^2(f - \Delta F) \cdot F_R^2(f)df \qquad (3)$$

حيث ان: Δf - الموالفه الترددية أي تردد الفرق (Frequency Difference) بين تردد الإشاره المرغوبة (Wanted Signal) وتردد الإشارة الغير مرغوبة (إشارة التداخل – Interfering Signal).

f_1 و f_2 - حدود التكامل التي تحدد إهتداءً بالترددات f ، والتي عندها تكون قيم الدوال $F_T(f)$ و $F_R(f)$ صغيرة جداً وبذلك يمكن إهمالها. وبوضع $\Delta f=0$ في (3)، نحصل على قيمة قدرة الإشارة المرغوبة على مخرج المستقبل عند خطأ الموالفة الصفري:

$$P_S = P_S(0) \qquad (4)$$

حيث أن P_S قدرة الإشارة المرغوبة. نحصل على:

$$A_{rel}(\Delta F) = 10 \cdot \log(P_S(\Delta F)/P_S) \qquad (5)$$

حل (3) يمكن تنفيذها على الحاسب الالي (PC) بواسطة الطريقة العددية عند استخدام خطوة التكامل (Step of Integration) B_{si}=10 HZ. قيمة هذه الخطوة كافية للحصول على حساب معقول الدقة، لإنه يتيح الحصول على نتيجة لعدد كبير من النقاط بما فيه الكفاية. التكامل بالطريقة العددية، وفق (3)، يمكن وصفه بالصيغة التالية:

$$P_S(\Delta F) = \frac{1}{B_{si}} \sum_{i=-\infty}^{i=\infty} F_T(B_{si} \cdot i - \Delta F)^2 \cdot F_R(B_{si} \cdot i)^2 \cdot B_{si} \qquad (6)$$

4. طيف إشعاع إشارة جهاز الإرسال (The Radiation Spectrum of the Transmitter Signal):

بشكل عام طيف الإشعاع يتكون من عدة مكونات (components) التي تحدد مركباته الطيفية:

$$F_T(f) = S_0(f) + S_{SB}(f) \cdot am + F_{off}(f) \qquad (7)$$

حيث أن: $S_o(f)$ - دالة تردد إشارة الحامل.

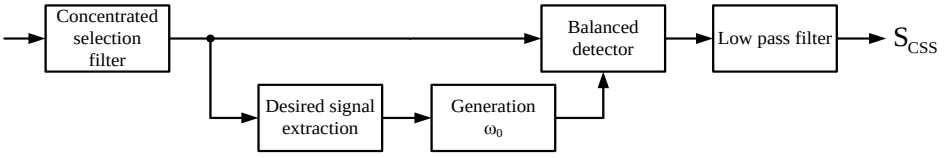
$S_{SB}(f)$ - دالة تصف إشارة النطاق الجانبي على مخرج المرسل.

am - المستوى النسبي (relative level) لكثافة القدرة الطيفية العظمى في النطاق الجانبي فيما يتعلق بالقدرة الذروية (Peak-Power). هذه القيمة تعتبر معامل مُقياس (Scale Coefficient)، الضروري للحصول على علاقات صحيحة بين قدرة الحامل وقدرة النطاق الجانبي.

F_{off} (f) - دالة تصف الإشعاع الجانبي (Out-Off-Frequency Emission) للمرسل.

1.4. دالة تردد الحامل (Function of the Carrier Frequency):

كما ذكر أعلاه، التردد الحامل في مرسل النطاق الجانبي المفرد يتم إخماده .ولكن عند غياب التردد الحامل، تظهر صعوبة كبيرة عند استرداد إشارة SSB-AM في جهة الإستقبال. هذه الصعوبة مرتبطة بضرورة تحقيق قيمة دقيقة للتردد المولد لحد ما في جهة الاستقبال، خطأ الموالفة لا ينبغي أن يتجاوز واحدات من الهرتز عند التردد بعشرات MHz. لذا، من أجل إسترداد الحامل في جهة الإستقبال يستعملون أما النغمة الدليلية المضافة في طيف الإرسال او بقايا الحامل المخمد. الحالة الأولى ملائمة الإستخدام عند إرسال عدد كبير من الأقنية من مركز واحد، والحالة الثانية اكثر بساطة في التنفيذ. النطاق الجانبي الغير مستعمل في جهاز الإرسال يُخمد بمقدار 40...50 dB، وهذا يسمح بإهماله عند إجراء الحسابات. لتأمين هذا المقدار للخمد يتم نقل طيف إشارة التردد المنخفض إلى منطقة التردد العالي، و هذا عادة مايتحقق بواسطة التحويل متعدد التردد (Multi-Frequency Conversion). كنغمة دليلية غالباً ماتستخدم بقايا التردد الحامل المُجمد في حدود ٪ 90 [7]. المخطط الصندوقي لإستخلاص الإشارة المجسمة المركبة عند إستعمال SSB-AM عند الإستقبال مبين في الشكل (3).



شكل (3): مخطط صندوقي لاستخلاص الإشارة المجسمة المركبة في جهة الإستقبال عند إستعمال SSB-AM

بهذا الشكل الدالة التي تصف بقايا الحامل ، يمكن كتابتها بالصيغة التالية:

$$S_0(f) = 10^{-(\frac{T}{20}+50\cdot|f|)} \qquad (8)$$

حيث ان: T- درجة الإخماد (Degree of Suppression) مستوى التردد الحامل. لنظام التضمين SSB-AM ،مقدار T يختار في حدود 12 dB [20].

هذه الدالة تعطي فقط قيمة $10^{-T/20}$عند التردد f=0، هذا يعني عند التردد المطابق للحامل. عند التردد (f) المختلف عن الصفر، قيمة هذه الدالة تقترب من الصفر. قدرة ذبذبة الحامل المحسوبة باستخدام (6) سوف تكون مساوية $B_{si}10^{-T/20}$عند الإخماد الجزئي، لإن عند التكامل بالطريقة العددية الدالة (8) ستعطي قيمة لا صفرية لمدى الترددات من 0 الى B_{si}.

2.4. طيف إشارة النطاق الجانبي (Spectrum of the Side-Band Signal-SB):

طيف إشارة النطاق الجانبي (SB) يمكن الحصول عليها بمعرفة طيف الإشارة المجسمة المركبة (Spectrum of CSS) ومنحنى الاستجابة الترددية لمرشح خرج المرسل (Frequency Response Curve):

$$S_{SB}(f) = S_{CSS}(f) \cdot F_T(f) \qquad (9)$$

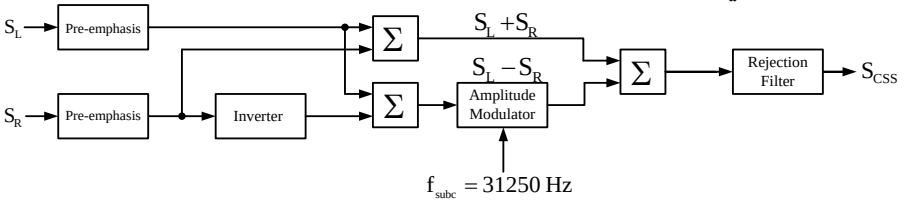
حيث أن: $S_{CSS}(f)$ - طيف الاشارة المجسمة المركبة.

$F_T(f)$ - الاستجابة الترددية لمرشح خرج المرسل.

1.2.4. بنية الاشارة المجسمة المركبة Structure of Complex Stereophonic (Signal):

كما ذكر اعلاه في اليمن، تستخدم طريقة توليد الإشارة المجسمة المركبة بمساعدة التعديل القطبي. عند هذا، الإشارة المجسمة المركبة تتشكل كالتالي: إشارة القناة اليمنى (Right Signal-S_R)وإشارة القناة اليسرى (Left Signal-S_L) تجمعان، وإشارة الجمع التي تم الحصول عليها تقع في الجزء السفلي من طيف الإشارة المجسمة المركبة بدون تغيير. هذا يؤمن توافق نظام البث الإذاعي المجسم مع أنظمة البث الإذاعي الغير مجسم (Monophonic Broadcasting)، بعد ذلك من الإشارات S_R و S_L تتشكل إشارة الفرق $S_S=S_R-S_L$. إشارة الفرق تضمن بواسطة حامل التردد الفرعي f_{subc} المساوية 31250 Hz. لتخفيض القدرة التي تنفق على الحامل الفرعي والتي لاتحتوي على معلومات مفيدة (Useful Information)، على المخرج يوضع مرشح رفض (Rejection Filter)، التي تخمد حامل التردد الفرعي جزئيا. بالإضافة إلى ذلك، كلا القناتين تخضع لتصحيح تحضيري للطيف، المعروف باسم دائرة التعزيز السابق (Pre-emphasis) لغرض الحصول على توزيع اكثر إنتظاماً لنسبة الإشارة إلى الضجيج (S/N) في طيف الإشارة.

المخطط الصندوقي للحصول على الإشارة المجسمة المركبة مبين بالشكل (4).



شكل (4): المخطط الصندوقي لتوليد الإشارة المجسمة المركبة

2.2.4. طيف إشارة البث الإذاعي الصوتي (Spectrum of Sound Broadcasting (Signal):

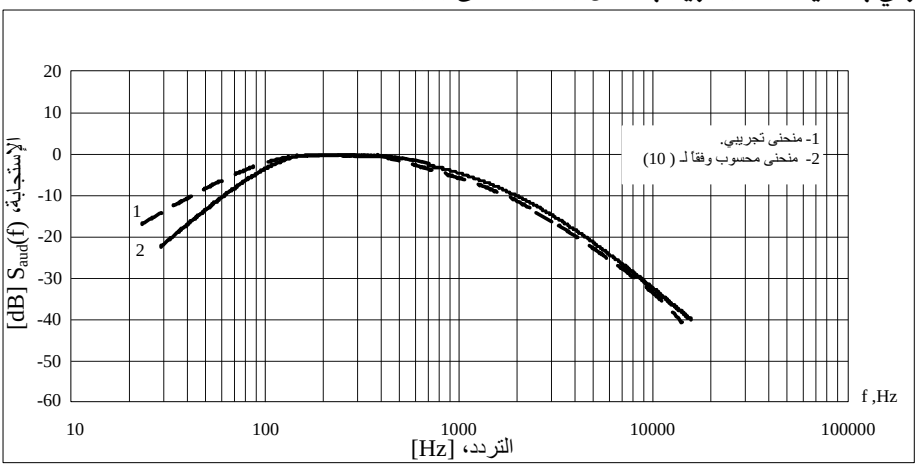
إشارة البث الإذاعي الصوتي هي عملية عشوائية الخصائص تتوافق مع خصائص متوسط الضجيج الموزون والمنسق (Normalized Weighted-Average Noise). توزيع القيم اللحظية للإشارة الصوتية (Sound Signal) يمكن وصفها من خلال توزيع جوسيه (Gaussian Distribution). الحد الأقصى لمستوى توزيع كثافة القدرة الطيفية

(Power Spectral Density-PSD) للإشارة المعطاة تقع في منطقة التردد 200. Hz شكل توزيع كثافة القدرة الطيفية لإشارة البث الإذاعي التي تعتمد كثيراً على طبيعة الإرسال ويمكن أن تتفاوت. الأبحاث التي أجريت على عدد كبير من البرامج المتنوعة سمحت بالحصول على الشكل المعمم لطيف الطاقة لإشارة البث الإذاعي (منحنى (1) شكل (5)) [21]. متوسط الطيف يمكن تقريبه بواسطة العبارة الرياضية، كما تم ذلك في [20]:

$$S_{aud}(f) = \frac{A_0 \cdot A_2 \cdot f^2}{\sqrt{B_8 \cdot f^8 + B_6 \cdot f^6 + B_4 \cdot f^4 + B_2 \cdot f^2 + B_0}} \qquad (10)$$

حيث أن:

$B_2 = 4.085 \cdot 10^8$, $B_4 = 47160$, $B_6 = 0.08674$, $B_8 = 9.243 \cdot 10^{-9}$,
$A_2 = 77.65$, $A_0 = 2.836$
$B_0 = 1.274 \cdot 10^{13}$, - معاملات التقريب (Approximation Coefficients). المنحنى المبني بالصيغة (10) مبين بالشكل (5) (منحنى (2)).

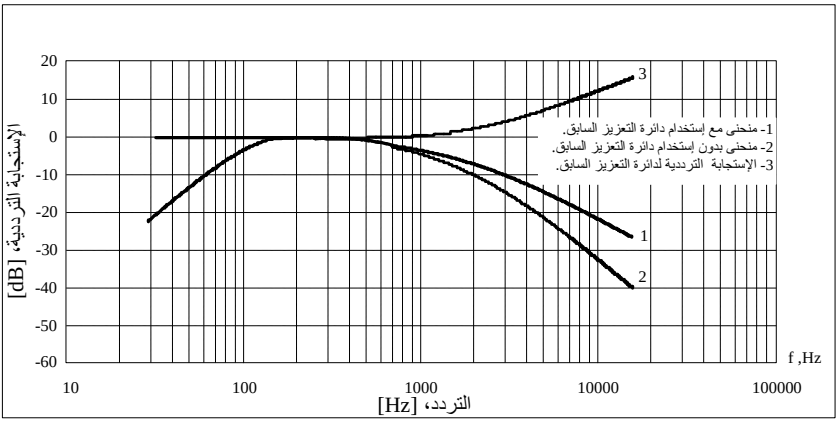


شكل (5): الطيف الطاقي العام لإشارة البث الإذاعي الصوتي

دائرة التعزيز السابق (التركيز) (Pre-emphasis) هي عبارة عن دائرة RC التي تؤمن إعادة توزيع طاقة الإشارة في الطيف لغرض التقليل من متوسط الضجيج التي تتعرض لها الإشارة . دائرة التعزيز السابق تؤمن رفع مستوى إشارة البث الإذاعي عند الترددات العليا. الإستجابة الترددية لدائرة التعزيز السابق تصفها الدالة الرياضية التالية (شكل(6)):

$$\gamma_{pre}(f) = \sqrt{1 + (2\pi\tau f)^2 \cdot 10^{-12}} \qquad (11)$$

حيث أن: τ - ثابت الزمن (Time Constant) لدائرة RC في اليمن والإتحاد الأوربي هذه القيمة قياسية (Standardized Quantity) وتساوي 50 µs ، وفي الولايات المتحدة الإمريكية هذه القيمة تُختار مساوية لـ 75 µs.



شكل (6): طيف الإشارة ذات التردد المنخفض

3.2.4. النموذج الرياضي للإشارة المجسمة المركبة (Mathematical Model of Complex Stereophonic Signal):

كما هو معلوم للحصول على الإشارة المجسمة المركبة، إشارة الفرق $S_S(F)$ تُضمن بواسطة إتساع إشارة الحامل الفرعي (Sub-carrier Signal) التي تساوي f_{subc}=31.25 kHz. عند تضمن الإتساع (AM) في طيف الإشارة تظهر إشارة الحامل وكذلك نطاقين جانبين للتردد (Double Side-Band-DSB). طيف إشارة الحامل الفرعي تصفه دالة دلتا (Delta Function).

$$S_{subc}(f) = \delta(f_{subc})$$

لوصف دالة دلتا يمكن تطبيق نهج مشابه لـ (8). بهذا الشكل تحصل على:

$$S_{subc}(f) = 10^{-(50\cdot|f+f_{subc}|)} \qquad (12)$$

هذه الدالة تعطي القيمة 1 فقط عندما يكون التردد (f) مساوياً لتردد إشارة الحامل الفرعي اي أن $f = f_{subc}$. وبإعتبار أن الحل في المستقبل سيتم إجراؤه بواسطة الطريقة العددية مع خطوة التكامل B_{si}=10 Hz و f_{subc}= 31.25 kHz. الشكل العام لدالة التوزيع الطيفي لقدرة الإشارة المجسمة المركبة يأخذ الشكل التالي:

$$S_{CSS}(f) = \sqrt{am_M}\cdot S_M(f) + \left(S_{subc}(f) + \sqrt{am_S}\cdot S_S(f)\right)\cdot \gamma_{pre_subc}(|f - f_{subc}|) \qquad (13)$$

حيث أن: $S_S(f) = S_M(|f - f_{subc}|), \qquad S_M(f) = S_{aud}(f)\cdot\gamma_{pre}(f)$

هذا يعني أن طيف إشارات قنوات المجموع و قنوات الفرق يمكن الإفتراض بانها متساوية. وفقاً للتجارب التي أجريت [21]، التركيبة الطيفية لإشارة المجموع S_M يمكن أن تؤخذ مساوية للتوزيع الطيفي للقدرة في كل من قنوات الإشارة المجسمة، والتركيبة الطيفية في قناة الفرق يمكن ايضا ان تؤخذ مساوية للتوزيع الطيفي للقدرة في كل من قنوات الإشارة المجسمة. بهذا الشكل، عند إستعمال AM لتضمين تردد الحامل الفرعي نحصل على مكونات قناة المجموع ونطاقين جانبيين لقناة الفرق في طيف الإشارة المجسمة. مستوى الإشارات في

النطاقات الجانبية ونطاق قناة المجموع تأخذ في الحسبان المعاملات am_M, am_S التي تحدد مستويات المركبات فيما يتعلق بالحامل الفرعي. هذه المعاملات يمكن الحصول عليها بواسطة تكامل الدالة الطيفية لتوزيع الإشارة ذات التردد المنخفض. ومن المعلوم أنه عند إستخدام تضمن الإتساع ذات النطاق الجانبي المزدوج (DSB-AM) قدرة إشارة الحامل تزيد بمرتين عن قدرة الإشارات في النطاقين الجانبيين. قدرة إشارات النطاقين الجانبيين اقل بمرتين من قدرة المركبات ذات التردد المنخفض، لإن الطاقة تقسم على النطاقين. كذلك كي القدرة الإبتدائية للإشارة ذات التردد المنخفض لا تأثر على النسبة الناتجة لقدرة الإشارات الصوتية وقدرة الإشارة الحاملة، من الضروري الحصول على معاملات قياسية am (Scale Coefficients) مع الأخذ بعين الإعتبار قدرة الإشارة الصوتية ذات التردد المنخفض وفقاً لـ [20]، لتضمن الإتساع ذات النطاق الجانبي المزدوج هذه المعاملات يمكن الحصول عليها بالشكل التالي:

$$am_S = \frac{m_s^2}{2} \cdot \frac{B_{si}}{2 \cdot B_{eaud}}, \qquad am_M = m_M^2 \cdot \frac{B_{si}}{B_{eaud}} \qquad (14)$$

حيث أن: m_S و m_M معامل التضمين (Modulation Index) لإشارة قناة الفرق وإتساع إشارة قناة المجموع على التوالي. هذه المعاملات تحدد مستويات مركبات الإشارة المجسمة المركبة:

$$U(t) = m_M \cdot U_M(t) + (1 + m_S \cdot U_S(t)) \cdot \sin(2\pi \cdot f_{subc} \cdot t)$$

عند تشكيل الإشارة المجسمة المركبة معامل التضمين لإشارة الحاملة يُختار مساوياً لـ 80٪،هذه البارامترات ستأخذ القيمة $m_M = m_S = 0.8$ [21].

قيمة B_{eaud} في (14) تطابق قدرة الإشارة ذات التردد المنخفض بعد تعزيزها مسبقاً هذه القيمة يمكن الحصول عليها بواسطة التكامل بالشكل التالي:

$$B_{eaud} = \int_0^{\infty} S_{aud}(f)df = \sum_{i=-\infty}^{i=\infty} S_{aud}(i \cdot B_{si}) \cdot B_{si} \qquad (15)$$

قيمة $\gamma_{pre_subc}(f)$ - الإستجابة الترددية (Frequency Response) لمرشح تخميد إشارة الحامل الفرعي في نظام التضمين القطبي. وفقاً لـ [21]. هذه الإستجابة يمكن وصفها بالشكل التالي:

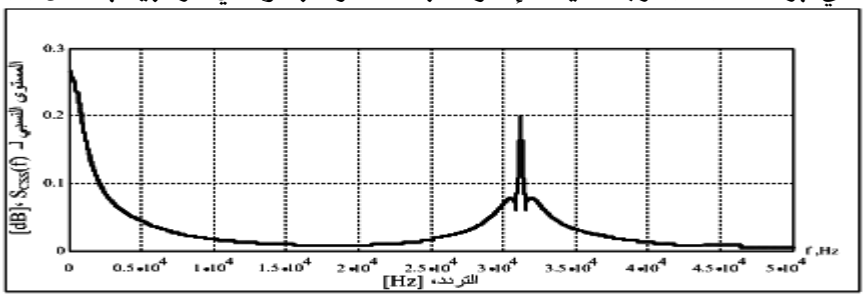
$$\gamma_{pre_subc}(f) = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2f'}{f_{subc}} Q\right)^2}}{\sqrt{E^2 + \left(\frac{2f'}{f_{subc}} Q\right)^2}} \qquad (16)$$

حيث أن: $Q=100$ - معامل جودة دائرة التخميد (Circuit Quality Factor of Suppression).

$E=5$ - معامل يحدد مستوى (درجة) دائرة التخميد.

f' - التردد النسبي (Relative Frequency) المتمركز في نقطة التخميد.

وبالتالي، بواسطة (13) نوجد طيف الإشارة المجسمة المركبة والذي هو مبين بالشكل (7).



شكل(7): طيف الإشارة المجسمة المركبة

4.2.4. تحديد نطاق إشارة الإرسال (Band-Limitation of Transmission Signal):

طيف إشارة النطاق الجانبي يمكن النظر إليها، مثل طيف الإشارة المجسمة المركبة المنقول إلى الأعلى بمحور التردد الى قيمة تردد الحامل والذي يحدده مرشح خرج المرسل. في حالتنا هذه إشارة المرسل ينظر لها على إنها متمركزة بالنسبة لتردد الحامل، هذا يعني ان القيمة الصفرية للتردد تطابق تردد الحامل، وبهذا الشكل مرشح المرسل الذي يحدد النطاق الترددي يجب أن يمرر الإشارة في نطاق الترددات من 0 إلى B_{CSS}، حيث B_{CSS} عرض نطاق الإشارة المجسمة المركبة. التردد الم كزي (Central Frequency) للمرشح، بهذا الشكل يساوي نصف عرض نطاق الإشارة المجسمة المركبة. لذا تسهيلاً للحسابات ندخل قيمة B_n نصف عرض نطاق الإشارة المجسمة المركبة، عند عرض النطاق الترددي للإشارة المجسمة المركبة مساوياً لـ 46 kHz، قيمة B_n تساوي 23 kHz. لوصف الإستجابة الترددية لمرشح تحديد النطاق يمكن إستخدام النموذج الرياضي لمرشح باتروث (Butterworth Filter). بشكل عام الإستجابة الترددية لمرشح باتروث يمكن وصفها رياضياً على النحو التالي:

$$F_B(f) = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{B_n}\right)^{N_S}}} \qquad (17)$$

حيث أن: B_N - نطاق قطع المرشح (Filter Cut-off Band).

N_S - معامل يحدد إنحدار أو ميلان (Slope) الإستجابة الترددية في نطاق القطع.

هذه الإستجابة يصفها مرشح إمرار الترددات المنخفضة (LPF). لإستعمال هذه الدالة من أجل وصف مرشح تمرير النطاق (Bandpass Filter-BPF) يجب إستبدال التردد بالقيمة المطلقة للفرق بين قيمة تردد الدخل والتردد المركزي لمرشح تمرير النطاق (BPF). القيمة N_S يمكن تحديدها بقيمة إنحدار قطع المرشح إستناداً إلى العلاقة التالية:

$$\alpha = \frac{4343}{B_N}(n-1)^{(n-1)/n} \qquad (18)$$

حيث ان: α - إنحدار قطع المرشح [dB/kHz].

$N_S = n$ معامل الإنحدار.

حل هذه المعادلة يمكن تنفيذه بواسطة أي طريقة عددية، على سبيل المثال بواسطة طريقة التنصيف (Bisection Method). مرشح المرسل ينبغي أن يكون له إنحدار كبير لحد ما، لذلك في (17) يمكن أخذ $N_S \to \infty$. لإجراء الحسابات نأخذ N_S=90، وهذا يطابق إضمحلال إنحدار الإستجابة الترددية للمرشح في حدود 15 dB/ kHz. بهذا الشكل نحصل على دالة مرشح المرسل:

$$F_T(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{|f - B_N|}{B_n}\right)^{N_S}}} \qquad (19)$$

5.2.4. تأثير الأشعاع الجانبي (Effect of Off-Frequency [Out-of-Band] Emission):

الإشعاع الجانبي هو المركبات الطيفية التي تتواجد على كلا الجانبين بالمجاورة مع نطاق الإشارة المرغوبة. هذه المركبات تظهر نتيجة التشويهات اللأخطية (Non-linear Distortion) لإشارة التضمين في المرسل. تاثير هذه التشويهات على الإشعاع الجانبي يمكن وصفها بواسطة معاملات التضمين البيني (Inter-modulation) ذو الرتبة الثالثة والرابعة. الأبحاث التي أجريت أظهرت أنه على حدود النطاق $f \pm B_N$ مستوى قدرة الإشعاع الجانبي تقريباً في D3 dB أقل من مستوى قدرة الإشارة المرغوبة

D3 - معامل التضمين البيني ذو الرتبة الثالثة. أضف الى ذلك خارج حدود النطاق المشار اليه، الإشعاع الجانبي يتضاءل تقريباً الى 15 dB/KHz متناظراً على كلا الجانبين. للحساب الرياضي للإشعاع الجانبي يمكن استخدام الصيغة الرياضية التالية:

$$F_{off}(f) = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{B_n}{f_c}\right)^{5.8}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{|f - B_N|}{f_c}\right)^{5.8}}} \cdot \sqrt{am} \cdot S_{SB}(2B_N) \cdot 10^{-\frac{0.95 \cdot D3}{20}} \qquad (20)$$

القيمة f_c= 40000 Hz أختيرت بهذا الشكل التقريبي، كي تؤمن إنحدار منتظم للإستجابة على التردد المركزي B_N. المعامل 5.8 يتوافق مع إنحدار إستجابة المرشح في حدود 15 dB/kHz am معامل مقياس يتم إيجاده على نحو مماثل لـ (14) بواسطة التكامل. $S_{SB}(2B_N)$ كمية تعطى قيمة مستوى قدرة الإشارة على حدود النطاق الجانبي للإشارة. القيمة D3 لمرسلات SSB-AM تُختار في المدى 40 dB...30.

6.2.4. طيف إشارة التضمين بنطاق جانبي مفرد (Spectrum of the SSB-AM Signal):

التوزيع الطيفي لقدرة الإشارة في النطاق الجانبي يمكن إيجاده بالشكل التالي:

$$S_{SB}(f) = S_{CSS}(f) \cdot F_T(f) \qquad (21)$$

وبمعرفة توزيع كثافة القدرة الطيفية للإشارة المجسمة المركبة في النطاق الجانبي يمكن إيجاد الدالة الطيفية لتوزيع قدرة إشارة SSB-AM بالشكل التالي:

$$S_{SSB}(f) = S_{BS}(f) \cdot \sqrt{am} + S_0(f) + F_{off}(f) \qquad (22)$$

am يتم ايجاده لإشارة SSB-AM على نحو مماثل لـ (14) كما يلي:

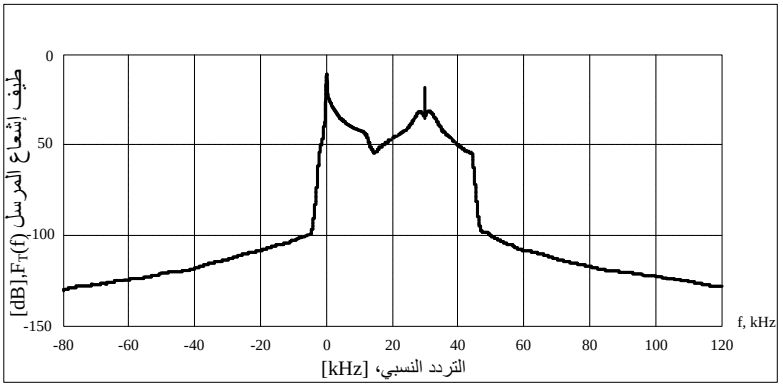
$$am = P_{RL} \cdot (1 - 10^{-\frac{T}{20}}) \cdot \frac{\sqrt{B_{si}}}{\sqrt{B_{E2}}} \qquad (23)$$

حيث أن: P_{RL} – المستوى النسبي لقدرة إشارة النطاق الجانبي في الطيف العام لإشارة SSB-AM. لنظام التضمين SSB-AM يمكن أخذ $P_{RL} = 0.35$.

القيمة B_{E2} – تعتبر قدرة إشارة النطاق الجانبي وتحسب على النحو التالي:

$$B_{E2} = \int_0^{\infty} S_{SB}(f)df = \sum_{i=-\infty}^{i=\infty} S_{SB}(i \cdot B_{si}) \cdot B_{si} \qquad (24)$$

وهكذا بإعطاء قيم البارامترات D3 = 35 dB، T= 12 dB، B_N =23000 Hz، α =15 dB/kHz، وبحساب دالة طيف الإشارة المجسمة المركبة مع SSB-AM بالصيغة (22) وبإستعمال الصيغ الرياضية (7) – (24) نحصل على التوزيع الطيفي لقدرة الإشارة المجسمة المركبة شكل(8).



شكل(8): التوزيع الطيفي لقدرة الإشارة المجسمة المركبة مع SSB-AM

بهذا الشكل، نحصل على التوزيع الطيفي لقدرة إشارة المرسل عند إستخدام نظام التضمين SSB-AM. كما يتبين من الشكل (8) الإشارة على مخرج المرسل لها قدرة قصوى (Maximum Power) في نطاق الإشعاع من 0 إلى B_N. خارج حدود نطاق الإشعاع مستوى القدرة ينخفض كثيراً، فقط مايحدده مستوى الإشعاع الجانبي. مستوى إشارة الحامل هو

dB 12- نتيجة تخميدها. مستوى الإشعاع الجانبي خارج حدود نطاق الإشارة المرغوبة هي قيمة في حدود dB 96-، ما يحدده المعامل D3=35 dB. دالة الإشعاع الجانبي تتحدد كما أشير إليه أعلاه، من هذه الإعتبارات لكي يكون مستوى الإشعاع الجانبي ادنى من مستوى الإشارة على حدود النطاق لقيمة D3. وبالتالي، مستوى الإشارة على حدود النطاق هي في حدود 61dB-. هذه الإشارة تتكون من مستوى الإشارة ذات التردد المنخفض على حدود النطاق التي تعمل عليه $S_{aud}(15000)$ في حدود dB 14-، توهين هذا المستوى الى dB 6 عند إستخدامه لإشارة AM ذات النطاق الجانبي عند تشكيل الإشارة المجسمة المركبة، توهينها بمقدار dB 3 بواسطة مرشح تمرير النطاق في المرسل $F_T(2B_N)$=3dB، توهينها الى dB am=10.4 عند إستخدام الإشارة المجسمة المركبة كنطاق جانبي للإشارة $S_{SSB}(f)$. الإستجابة متمركزة بالنسبة لتردد إشارة الحامل في نطاق الإرسال ذات الترددات العالية جدا، وبالتالي الإستجابة الحقيقية للإشارة على مخرج المرسل سيكون لها الشكل التالي:

$$S_T(f) = S_{SSB}(f - f_{t0}) \qquad (25)$$

5. الإستجابة الترددية لمرور الإشارة عند الإستقبال (Frequency Response of the Signal in the Reception End):

تأثير دخل مرشح إمرار النطاق عند الاستقبال فك شفرة (Decoding) الإشارة المجسمة المركبة، ازالة التعزيزالسابق (de-emphasis)، وكذلك المعالجة البسوفومترية للإشارة (Psophometric Signal Processing)، هذه التاثيرات يمكن تمثيلها رياضياً في عبارة واحدة كالتالي:

$$F_R(f) = F_{sel}(f) \cdot F_{de}(f) \cdot F_{ps}(f) \qquad (26)$$

حيث أن: $F_R(f)$ - الإستجابة العامة لمعالجة الإشارة عند الإستقبال.

$F_{sel}(f)$ - الإستجابة الترددية لمرشح الدخل ذو الإنتقاء (الإختيار) المركز (Filter Concentrated Selection)

للمستقبل، هذه الإستجابة يجب أن تأخذ في الإعتبار البارامترات الأساسية للمرشح ذو الإنتقاء المركز، نطاق تمرير المرشح، وهبوط إنحدار الإستجابة الترددية خارج نطاق التمرير.

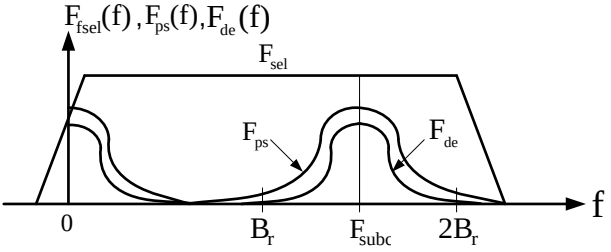
$F_{de}(f)$ - الإستجابة الترددية لدائرة التعزيزاللاحق (De-emphasis)

$F_{ps}(f)$ - الإستجابة البسوفومترية، التي تأخذ في الحسبان حساسية اذن الإنسان (Sensitivity of Human Ear) للمكونات المختلفة للطيف الترددي لإشارة التردد الصوتي.

مظهرعام للمنحنيات التي تصف الدوال المشار اليها أعلاه مبينة بالشكل (9).

هذه الإستجابات يجب ان تمتلك مركبتين، مركبات معالجة إشارة المجموع وإشارة الفرق للإشارة المجسمة المركبة، مركبة ضرورية لمعالجة S_S يجب أن تتواجد بشكل متماثل على كلا الجانبين من إشارة الحامل الفرعي للإشارة المجسمة المركبة.

هذه المركبات يمكن الحصول عليها بواسطة نقل الطيف، لإنه بعد إزالة التضمين (Demodulation) مركبة S_S تخضع لمعالجة بشكل مماثل لإشارة المجموع .



شكل (9): المنظر العام للإستجابات الأساسية للمستقبل

هذه الإستجابات الترددية متمركزة بالنسبة لتردد إشارة الحامل. وبالتالي، فإن المستقبل يمرر على المخرج إشارة في المدى من F_r إلى F_r+2B_r، حيث أن B_r - نصف نطاق تمرير المستقبل. لتسهيل الحسابات سوف نستخدم فقط الترددات النسبيه.

1.5. دالة الإنتقائية لمرشح الإختيار المركز (Selectivity Function of Filter Concentrated Selection):

كما ذكر أعلاه إنتقائية مرشح الإختيار المُركز يحدده نطاق تمرير التردد (Frequency Passband)، وهبوط إنحدار الإستجابة الترددية. أجهزة الإستقبال من الطبقة الوسطى (Middle Class) تتصف بان لها إنحدار شديد للإستجابة في حدود المدى: dB/kHz 8…12 [20]. إستخدام مرشحات الإختيار المُركز من النوع الميكانيكي، التي تستخدم رنانات الكوارتز (Quartz Resonators) تسمح بالحصول على قيمة إنحدار في حدود: . 15…30 dB/ kHz كقاعدة مرشح الإختيار المُركز يتم وصله في مراحل التردد البيني (Intermediate Frequency)، لتقليل معامل نطاق التمرير النسبي. قيمة هبوط إنحدار الإستجابة الترددية لمرشح الإستقبال للإشارة المجسمة المركبة عند إستخدام SSB-AM لتأمين جودة عالية للبث الإذاعي يتطلب أخذ ليس اقل من 15 dB/ kHz. رياضياً هذه الإستجابة يمكن وصفها بشكل مماثل لـ (19) كالتالي:

$$F_{sel}(f) = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{|f - B_r|}{B_r}\right)^{N_r}}} \qquad (27)$$

حيث أن: B_r - نصف عرض نطاق تمرير مرشح المستقبل، الإستجابة الترددية للمستقبل متناظرة بالنسبة لـ B_r والتي تمثل ايضاً التردد المركزي للإستقبال. وبالتالي نطاق تمرير المرشح هو : من 0 إلى $2B_r$.

N_r - معامل هبوط إنحدار الإستجابة يحدد بواسطة α انطلاقاً من (18).

عند الإنحدار المساوي لـ 15 dB/kHz ، $2B_r$ = 46 kHz ، المعامل N_r = 88.

2.5. التعزيز اللاحق (De-emphasis):

الاسترجاع العكسي للتعزيز السابق عند الإستقبال يسمى بالتعزيز اللاحق (إزالة التركيز) والذي يتحقق بواسطة دائرة RC التفاضلية. رياضياً الإستجابة الترددية لدائرة RC يمكن إيجادها على أنها الدالة العكسية لـ (11):

$$\gamma_{de}(f) = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi f)^2 \cdot 10^{-12}}}, \qquad (28)$$

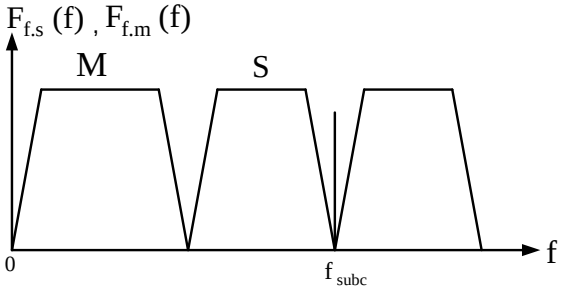
هذه الدالة تصف الدالة العكسية لدائرة التعزيزالسابق فقط للجزء ذو التردد المنخفض من إشارة الإشارة المجسمة المركبة. عند إستخلاص القناة اليمنى والقناة اليسرى من الإشارة المجسمة المركبة يجري إسترجاع التعزيزالسابق لكلا القناتين، وبالتالي الإستجابة الترددية لقناة المجموع والفرق سوف تتغير بقانون واحد.

كما هو مبين في الشكل (9) هذه الإستجابة يجب ان تنقل ايضاً إلى F_{subc} للأعلى بالتردد لكلا الحوامل الفرعية. إضافة الى ذلك الإشارة المجسمة المركبة في المستقبل يفصل إلى مركبات S_S و S_M بالتردد (كاشف AM detection – AM). وبالتالي يجب الأخذ في الحسبان إستجابات مرشحات الفصل (Separating Filters) لمعالجة الـ CSS في جهة الإستقبال. هذه الدوال يمكن وصفها بواسطة النموذج الرياضي لمرشح باترورث بالشكل التالي:

$$F_{f_m}(f) = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{|f - f_{subc}/4|}{f_{subc}/4}\right)^{N_S}}}$$

$$F_{f_s}(f) = \frac{1-10^{-(50\cdot|f+f_{subc}|)}}{\sqrt{1+\left(\frac{|f - f_{subc}/4|}{f_{subc}/4}\right)^{N_S}}} \qquad (29)$$

ايضا هذه الدوال تصف إستجابة المرشح الذي يفصل المركبات ذات التردد المنخفض في الإشارة المجسمة المركبة – $F_{f_m}(f)$ ومركبات قناة الفرق المتواجدة على الحامل الفرعي – $F_{f_s}(F)$. الدالة الثانية هي مرشح إستخلاص (تمييز) الإشارة في نطاق الإشارة S المتواجدة على تردد الحامل الفرعي F_{subc} والإشارة المُخمدة نفسها هي إشارة الحامل الفرعي والتي تؤمن بسط الدالة. الكمية N_S تحدد شدة إنحدار إستجابات المرشحات وتختار بما فها الكفايه كبيرة. في حالتنا هذه القيمة تختار مساويةً لـ 90، وهذا يؤمن إنحدار في حدود 15 dB/ kHz.



شكل(10): إستجابات مرشحات الفرز(الإستخلاص)

بهذا الشكل الإستجابة المحصلة لدائرة التعزيزاللاحق وإعادة الترشيحات لإشارة الإشارة المجسمة المركبة ستظهر كالتالي:

$$F_{de}(f) = \gamma_{de}(f) \cdot F_{f_m}(f) + \gamma_{de}(|f - f_{subc}|) \cdot F_{f_s}(f). \quad (30)$$

3.5. المعالجة البسوفومترية للإشارة (Psophometric Signal Processing):

كما هو معلوم حساسية الأذن البشرية في نطاق الترددات السمعية غير منتظمة. الحساسية القصوى تطابق الترددات قرب التردد 7000 Hz عند زيادة أو نقصان التردد حساسية الأذن تنخفض. حساسية الأذن يصفها المنحنى البسوفومتري (Psophometric Curve) الذي يجب أخذه بعين الإعتبار عند إيجاد قدرة إشارة الضجيج (Power of Noise Signal). كلما كانت الحساسية أكبر كلما كان تأثير الضجيج أقوى على جودة الصوت وكلما كان الضجيج أوضح. قدرة الإشارة التي حُصل عليها بواسطة تكامل حاصل ضرب الإشارة على مخرج المستقبل والإستجابة البسوفومترية (Psophometric Response) التي تسمى القدرة الموازنة لقياس الضوضاء (Psophometric Weighted). هناك طرق رياضية مختلفة لوصف المنحنى البسوفومتري على سبيل المثال في [22, 23] وصفت توصية (Recommendation ITU-R BS.468-4) لإنشاء المنحنى المشار إليه (شكل (11) منحنى (1)). المزيد من التوصيات الحديثة على النحو المحدد في [20]، الوصف التالي للإستجابة البسوفومترية:

$$\gamma_{PS}(f) = \frac{4 \cdot |f^2|}{\sqrt{A^2(f) + B^2(f)}}, \quad (31)$$

$$A(f) = -K_6 \cdot f^2 + K_4 \cdot f^4 + K_2 \cdot f^2 - K_4,$$
$$B(f) = -K_5 \cdot |f|^5 + K_3 \cdot |f|^4 + K_1 \cdot |f|, \quad (32)$$

حيث أن المعاملات لها القيم التالية:

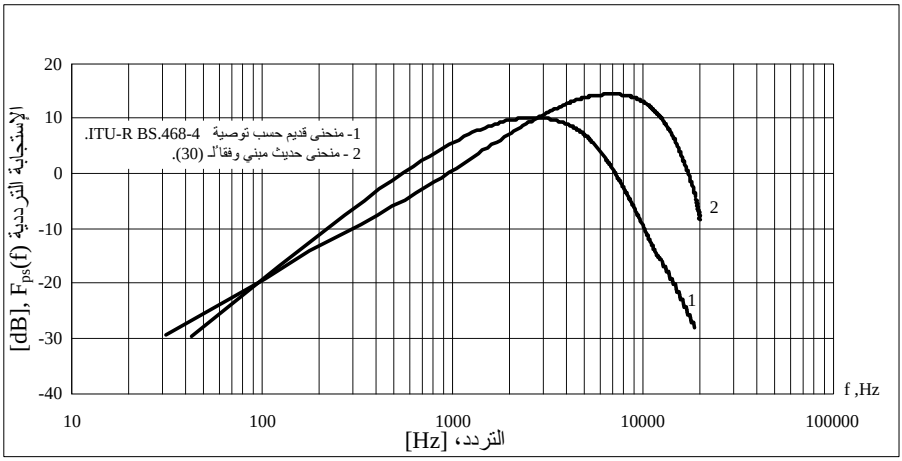
$$K_3 = 8.3417 \cdot 10^{-8}, \quad K_2 = \quad K_1 = 0.2124, \quad K_0 = 0.401 \cdot 10^4$$
$$K_4 = 8.1023 \cdot 10^{-12}, \ 5.3848 \cdot 10^{-4},$$
$$.K_6 = 1.9 \cdot 10^{-20}, \quad K_5 = 5.1866 \cdot 10^{-16},$$

الإستجابات المحسوبة بواسطة هذه الصيغ الرياضية المشار اليها أعلاه مبينة بالشكل (11) منحنى 2.

بشكل مماثل لدالة التعزيزالسابق، المعالجة البسوفومترية من الضروري أن تتعرض لكلا مركبات الإشارة المجسمة المركبة.

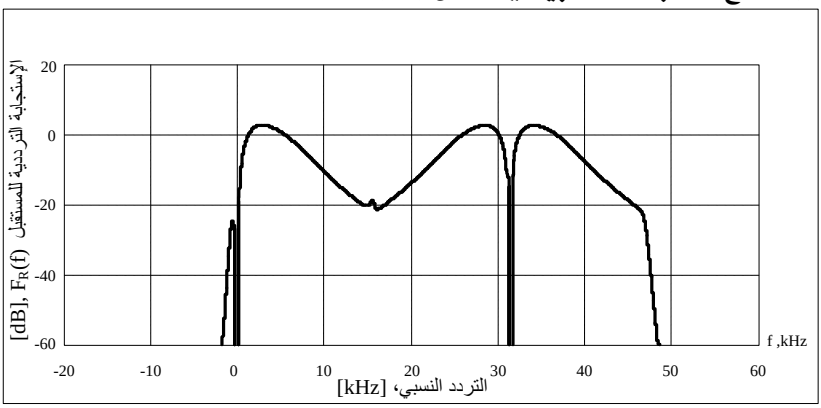
وفقا لذلك نحصل على الدالة البسوفومترية للإشارة المجسمة المركبة:

$$F_{PS}(f) = \gamma_{PS}(f) \cdot F_{f_m}(f) + \gamma_{PS}(|f - f_{subc}|) \cdot F_{f_s}(f). \qquad (33)$$



شكل (11): المنحنى البسوفومتري

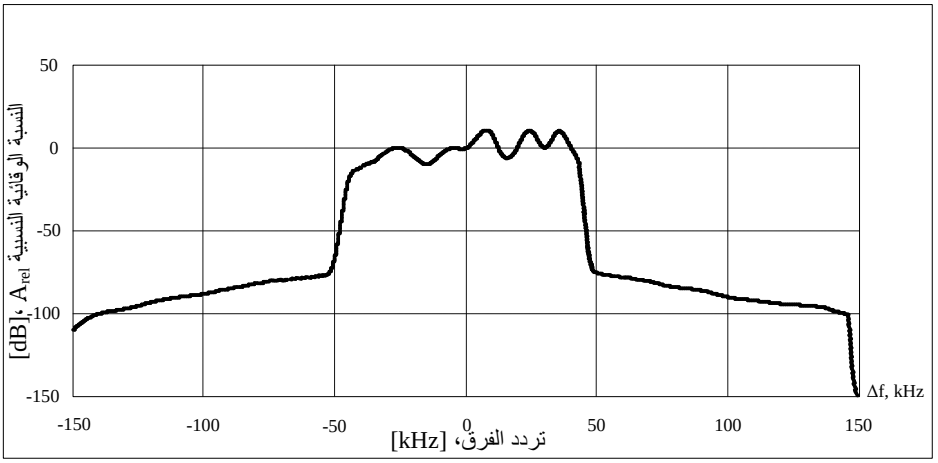
وهكذا، نعوض عن الدوال (26 – 32) في الدالة (25) نحصل على الدالة المحصلة $F_r(f)$ التي تحدد توهين المركبات الطيفية عند مرورها بدوائر المستقبل قبل مقياس القدرة (Power Meter). نتائج حساب الدالة مبين في الشكل (12).



شكل (12): الإستجابة الترددية للمستقبل

6. الإستنتاج والنقاش (Result and Discussion):

النسبة الوقائية النسبية يمكن حسابها بـ (5) مع إستخدام (3- 6) وكذلك الإستجابات الترددية $F_T(f)$، $F_R(f)$. وبإجراء الحسابات المشار اليها أعلاه وحساب النسبة الوقائية النسبية A_{rel} بـ dB نحصل على المنحنى المبين بالشكل (13).



شكل (13): النسبة الوقائية النسبية المحسوبة

كما أُشيرَ اليه أعلاه، وفقاً لـ (1) النسبة الوقائية، التي يتطلب تحقيقها على مدخل المستقبل عند المباعدة الترددية (Frequency Spacing) المعرفة بين الترددات الحاملة للمرسل المرغوب والمرسل الذي يعتبر كمصدر للضجيج (الغير مرغوب)، يمكن الحصول عليها بمساعدة الخصائص التي تم الحصول عليها للنسبة الوقائية النسبية عن طريق الإضافة الى قيمتها مستوى النسبة الوقائية المطلوبة التي تطابق جودة الإستقبال. كما أُشيرَ اليه في [18]، تتواجد معايير لبارامترات جودة استقبال البث الإذاعي الصوتي. لقناة البث الإذاعي ذات الجودة العالية، الذي يغطيها هذا البحث، المناعة المطلوبة (Required Immunity) من الضجيج الموزون هي 50 dB. لنظام تضمين SSB-AM فقط عند خطأ الموالفة الصفرية للتردد بين ترددات المرسل المرغوب والمرسل الذي يعتبر كمصدر للضجيج يمكن إعتباره في شكل متماسك عند إزاحة تردد المرسل الذي يعتبر كمصدر للضجيج، مركبات طيف الضجيج ستظهر مزاحه في الإشارة المستقبلة ذات التردد المنخفض، الأمر الذي يسمح بإعتبار مثل هذا الضجيج غير واضح. كما يتبين من الشكل (13) عند إزاحة ترددات المرسل الذي يعتبر كمصدر للضجيج إلى ±47 kHz النسبة الوقائية النسبية تنخفض الى قيمة أقل من 50- dB. وهكذا في هذه الحالة إذا كان المرسل المرغوب والمرسل الذي يعتبر كمصدر للضجيج يقعان في مركز واحد، وهذا الذي يحدث عند البث الإذاعي متعدد البرامج، المباعدة الترددية بين القناتين المتجاورتين للبث الإذاعي يجب ان تكون ليس أقل من 47 kHz وهذه بضعة في المئة يفوق عرض النطاق الترددي للإشارة المجسمة المركبة. توزيع قيم النسبة الوقائية

النسبية في النطاق الترددي من 47- kHz إلى 47+ kHz غير منتظم وغير متماثل بالنسبة للتردد المركزي. هذا يرجع إلى الطبيعة الغير منتظمة لطيف إشارة الإرسال والإستجابة الترددية العامة للمستقبل. وكمثال، إرتفاع منحنى A_{rel} عند التردد 32- kHz نظراً لوقوع إشارة بقايا الحامل الفرعي في إشارة S لمركبات الإشارة المجسمة المركبة في منطقة التردد 200...400 Hz للإشارة على مخرج المستقبل، الذي فيه الضجيج يكون ملحوظاً مع الأخذ بعين الإعتبار التعزيزاللاحق والموازنة البسوفومترية هي الحد الأقصى. عند تواجد المرسل الذي يعتبر كمصدر للضجيج والمرسل المرغوب، ونقطة الإستقبال على مسافات معينة من بعضها البعض، مستوى الإشارة من كل واحد من المصادر غير متساوية على مدخل المستقبل. وبالتالي عند إستخدام قناة مشتركة (Co-channel) المرسلات التي تعمل على تردد واحد اي نفس التردد يجب أن تكون متباعدة إلى هذه المسافة كي تتناسب قدرات الإشارات التي يمكن إستقبالها منها بحيث لا تزيد عن قيمة $A_{r.req}$. كما يتبين من الشكل (13) حتى مع وجود إزاحة صغيرة للتردد Δf النسبة الوقائية تزداد سوءً، وذلك لإن بقايا تردد إشارة الحامل لإشارة SSB-AM التي تبدو تأثيراً ملحوظاً على جودة الإستقبال في القناة المشتركة تقع في منطقة الإستقبال الحساسة وتأثيرها الملحوظ يعزز كثيرا. النسبة الوقائية النسبية تم الحصول عليها للبارامترات الثابتة لإجهزة الإرسال والإستقبال.

7. الخلاصة (Conclusion):

النموذج الرياضي الموصوف في المقال لنظام إرسال وإستقبال الإشارة المجسمة الذي يستخدم نظام التضمين SSB-AM يسمح بالحصول على النسبة الوقائية للبارامترات المعطاة. الخاصية التي تم الحصول عليها تتيح ليس فقط تحديد التباعد الترددي (Frequency Spacing) الضروري بين مرسلين معرضين لتأثير التداخل المتبادل، ولكن أيضاً تحقيق الإستخدام الأمثل (Optimizing) للطيف الترددي، الجمع بين المباعدة الفضائية والترددية للمرسلات وإستخدام مناطق الحد الأدنى للنسبة الوقائية النسبية في نطاق الإشارة المرغوبة هذا يعطي إمكانية توفير مباعدة الترددات اقل من عرض النطاق الترددي للإشارة على مسافة كافيه للمرسلات من بعضها البعض.

تجدر الإشارة إلى أن الشبكة الحالية لمرسلات البث الإذاعي في اليمن تستخدم FM للإشارة وبالتالي فإن عند إدخال مرسلات SSB-AM في هذه الشبكة من الضروري أن يكون لها نسبة وقائية عند التأثير المتبادل لإشارة FM على مستقبل SSB-AM وإشارة SSB-AM على مستقبل FM. الأول يمكن إنجازه بإستخدام النموذج الرياضي الموصوف، بإستعمال طيف إشارة التداخل كطيف إشارة البث الاذاعي FM. التأثير العكسي يمكن الحصول عليه بإستخدام إشارات معروفه كإشارة SSB-AM وإشارة FM عند تأثيرهما المشترك على مستقبل FM.

8. المراجع (References):

[1] kononovitsh L. M. Stereophonic Radio Broadcasting. Communication, Moscow 1974.
[2] Vyhodits A. B. Broadcasting and Electroacoustics, Textbook, Publisher: Radio and Communication, Moscow, 1989.
[3] http://en.wikipedia.org/wiki/Stereophonic_sound
[4] Kovalgin Y. A., Volodin, E. J., and Katznelson L. N. Stereophonic Radio Broadcasting and Sound Recording. Publisher: Hot Line – Telecom, Moscow, 2007.
[5] Schiphorst R., Moseley N., Aarden A., Heskamp H., and Slump C., "A T-DAB field trial using a low-mast infrastructure," IEEE Trans. Broadcasting, 2008.
[6] Hoeg W., and Lauterbach T.: Digital Audio Broadcasting: Principles and Applications of DAB, DAB + and DMB, 3rd Edition, : Wiley, Germany, 2009.
[7] http://www.ebu.ch/en/technical/trev/trev_296-dab.pdf
[8] http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_Audio_Broadcasting
[9] SDH Digital Microwave Radio System. Tokyo, Japan.: NEC corp., 1995
[10] Raab F. H., Asbeck P., Cripps S,. Kenington P. B., Popovic Z. B, Pothecary N., Sevic J. F., and Sokal N. O., "Power amplifiers and transmitters for RF and microwave," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, № 3, pp. 814 - 826, March 2002.
[11] CCIR Report 781-2, XVI Plenary Assembly, vol. IX, part 1. Dubrovnik.1986.
[12] Kanno Taketo. Transceiver to work with Single Side-Band AM in the Range 50 MHz. Hamu Janaru. = HAM.J.-1991, № 6. PP.44-49.
[13] ITU-R Report BS.1059-1: Characteristics of single-sideband systems in HF broadcasting. Geneva, 1990.
[14] Ji P. F., Gan W. S., Tan E. L., Yang J, "Performance Analysis on Recursive Single-Sideband Amplitude Modulation for Parametric Loudspeakers", IEEE International Conference on Multimedia & Expo, Singapore, 2010.
[15] Philipp, J.: Traditional protection ratios in FM sound broadcasting – still appropriate for interference management, Adv. Radio Sci., 9, 391-396, doi: 10.5194/ars-9-391-2011, 2011.
[16] CCIR (Comit´e Consultatif International des Radio-communications): Recommendation 641, Determination of radio-frequency protection ratios for frequency-modulated sound broadcasting, Geneva (also available as ITU-R Rec. BS.641), 1986

[17] ITU (International Telecommunication Union): Recommendation ITU-R BS.559-2, Objective measurement of radio-frequency protection ratios in LF, MF and HF broadcasting, Geneva, 1990.
[18] Zhmurin P. M, Zorin I. F, and Kovalgin U. A. Audio Broadcasting. Handbook: Radio and Communication, Moscow, 1993.
[19] http://www.qsl.net/vu2msy/transmit.htm.
[20] Groschel G. A Mathematical Model for Calculation of the Adjacent Channel Interference in Single-Side-Band and Double Side-Band AM Sound Broadcasting Systems. EBU Review Tech. June 1978, 169- pp.122-136.
[21] Kononovich L. M: VHF Broadcasting reception. Publisher: Energy, Moscow, 1977.
[22] Kantor L. Y., Minashin V. P., Timofeev V. V. Satellite Broadcasting: Radio and Communication, Moscow, 1981.
[23] ITU (International Telecommunication Union): Recommendation ITU-R BS.468-4, Measurement of audio-frequency noise voltage level in sound broadcasting, Geneva, 1986.