

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electronique
Centre de Développement des Technologies Avancées
Mémoire de Master en Electronique

**Conception des filtres UWB Intégrés pour
les Applications WPAN**

Travail réalisé par :

Oussama HADDAD

Présenté et soutenu publiquement, le 04 Juillet 2017, devant le jury composé de :

Président :	M. Rabia AKSAS	Professeur	ENP Alger
Rapporteur :	M. Mohamed TRABELSI	Professeur	ENP Alger
Examineur :	M. Mourad ADNANE	Docteur	ENP Alger

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electronique
Centre de Développement des Technologies Avancées
Mémoire de Master en Electronique

**Conception des filtres UWB Intégrés pour
les Applications WPAN**

Travail réalisé par :

Oussama HADDAD

Présenté et soutenu publiquement, le 04 Juillet 2017, devant le jury composé de :

Président :	M. Rabia AKSAS	Professeur	ENP Alger
Rapporteur :	M. Mohamed TRABELSI	Professeur	ENP Alger
Examineur :	M. Mourad ADNANE	Docteur	ENP Alger

Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier **Dieu** le miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **Abdelhalim Saadi**, de m'avoir offert une attention particulière et pour son dynamisme, ses compétences scientifiques et sa disponibilité tout au long de ce parcours qui m'ont permis de mener à bien ce projet. Qu'il soit assuré de ma reconnaissance.*

*Un remerciement spécial à Monsieur **Mohammed Trabelsi**, de m'avoir accordé sa confiance et de m'avoir accompagné tout au long de cette expérience avec beaucoup de patience et de pédagogie.*

*Toutes mes reconnaissances les plus vives s'adressent à Monsieur **Rabia Aksas** pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de ma soutenance, et à Monsieur **Hicham Bousbia-Salah** en acceptant d'examiner mon travail.*

*Enfin, tous mes remerciements et reconnaissances aux membres de l'équipe « **Analog RFIC** » du Centre de Développement des Technologies Avancées. Et à tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation du présent travail.*

Dédicace

A ma mère et mon père

A mes sœurs ainsi qu'à leurs enfants

A mon frère et à toute ma famille

A tous mes amis et mes collègues

A tous ceux qui travaillent jour et nuit pour un monde meilleur

Et enfin, à tous les opprimés sur terre

ملخص

يركز العمل المعروض في هذه المذكرة يتناول تصميم مرشحات المايكروويف لأنظمة النطاق العريض جدا. تعد تكنولوجيا النطاق العريض جدا مرشحا جيدا لنشر الشبكة اللاسلكية الشخصية، وذلك بفضل الميزات الجذابة للغاية التي تقدمها، بما في ذلك عرض النطاق الترددي الكبير جدا الذي يتراوح بين 3.1 و10.6 جيجا هيرتز. لكن هذا الأخير يزيد من القيود المتعلقة بالتداخل مع الأنظمة الراديوية العاملة داخل أو بالقرب من النطاق المذكور. ولهذا الغرض، يصبح استخدام المرشحات ضرورة للحد من التأثير على هذه التداخلات. ويتمثل العمل الذي قمنا به في تصميم مرشحين لأنظمة النطاق العريض جدا، عالية الاداء

الكلمات المفتاحية: أنظمة النطاق العريض جدا، الشبكات اللاسلكية الشخصية، مرشح تمرير النطاق، المايكروويف، تقنية فقدان الادراج، اهليجي، تشيبيشيف معاكس

Abstract

The work presented in this paper deals with the design of microwave filters for Ultra Wide Band (UWB) systems. UWB technology promises to be a good candidate for a Wireless Personal Area Network (WPAN) deployment, thanks to the very attractive features it offers, including its very large bandwidth ranging from 3.1GHz to 10.6 GHz. Nevertheless, the latter increases the constraints related to the interference with the radio systems operating either inside or near the said band. For this purpose, the use of filters becomes a necessity to reduce the effect to these interferences. The work we have done focus on the design of two UWB filters, the designed filters show good performances

Keywords: UWB, WPAN, Band pass filter, Elliptic, invrese Chebyshev, Insertion Loss technique, microwave.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la conception des filtres micro-ondes destinés aux systèmes ultra large bande (UWB : *Ultra Wide Band*). La technologie UWB promet d'être un bon candidat pour un déploiement des réseaux WPAN (*Wireless Personal Area Network*), cela grâce aux caractéristiques très attrayantes qu'elle offre, notamment sa très large bande passante qui s'étale de 3.1GHz à 10.6 GHz. Néanmoins cette dernière augmente les contraintes liées aux interférences avec les systèmes radio opérant soit à l'intérieur soit au voisinage de la dite bande. A cette fin, l'utilisation des filtres devient une nécessité pour réduire l'effet à ces interférences. Le travail que nous avons réalisé s'articule sur la conception de deux filtres UWB, les filtres conçus présentent de bonnes performances

Mots-clés : UWB, WPAN, Filtre passe-bande, Elliptique, Chebyshev inverse, méthode des Pertes d'insertion, micro-ondes

Table des Matières

<i>Liste des Figure</i>	
<i>Liste des Tableaux</i>	
<i>Liste des abréviations</i>	
<i>Liste des symboles</i>	
<i>Introduction générale</i>	11
Chapitre 1	
<i>1.1. Introduction</i>	14
<i>1.2. Avantages de la UWB</i>	14
<i>1.3. UWB dans les réseaux WPAN</i>	15
1.3.1. Communication à haut débit HDR (<i>High-Data-Rate</i>)	16
1.3.2. Communication bas débit LDR (<i>Low-Data-Rate</i>)	16
<i>1.4. Spécifications de filtrage UWB dans les réseaux WPAN</i>	16
<i>1.5. Filtrage UWB</i>	18
<i>1.6. Conclusion</i>	18
Chapitre 2	
<i>2.1. Introduction</i>	20
<i>2.2. Synthèse des filtres par la méthode des pertes d'insertion</i>	20
<i>2.3. Fonctions de filtrage</i>	23
<i>2.5. Critères d'évaluation des filtres</i>	25
<i>2.5. Implémentations des filtres choisis</i>	26
<i>2.6. Conclusion</i>	
<i>Conclusion générale</i>	31
<i>Références bibliographiques</i>	32

Liste des Figure

Figure 1. 1: Définition de FCC relative aux masques UWB. (a) Indoor. (b) Outdoor [6].....	17
Figure 2. 1 : Circuits prototype du filtre passe-bas pour les fonctions de filtrage zero-pole. (a) commençant par une capacité parallèle. (b) commençant par une inductance série [4].....	21
Figure 2. 2 : (a) Circuit du filtre passe-bas de Butterworth N=6 après dénormalisation. (b) Circuit du filtre passe-bande UWB de Butterworth N=6.	22
Figure 2. 3 : Circuits prototype du filtre passe-bas d'ordre 4. (a) commençant par une capacité parallèle. (b) commençant par une inductance série.	23
Figure 2. 4 : Schéma électrique du FPB UWB en utilisant Tchebychev 2 d'ordre 4	27
Figure 2. 5 : Schéma électrique du FPB UWB en utilisant elliptique d'ordre 4.....	27
Figure 2. 6 : Caractéristiques du filtre passe-bande UWB en utilisant Tchebychev 2 d'ordre 4.....	28
Figure 2. 7 : Caractéristiques du filtre passe-bande UWB en utilisant elliptique d'ordre 4.....	28

Liste des Tableaux

Tableau 1. 1 Définition du FCC des masques d'émission Indoor et Outdoor des systèmes UWB [6]	17
Tableau 2. 1 : Les valeurs des éléments du prototype passe-bas du filtre elliptique [12].	25
Tableau 2. 2 : Valeurs des éléments des filtres pour les deux fonctions Tchebychev 2 et Elliptique d'ordre 4	26

Liste des abréviations

WPAN	Wireless Personal Area Network
UWB	Ultra Wide Band
IOT	Internet Of Things
SoC	System on Chip
HDR	High Data Rate
LDR	Low Data Rate
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
ADS	Advanced Design System
FCC	Federal Communication Commission
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductors
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
FSF	Frequency Scaling Factor

Liste des symboles

f_c, ω_c : Fréquence et pulsation de coupure

f_0, ω_0 : Fréquence et pulsation centrale.

R_L : Résistance de charge

R_s : Résistance de source

L_{As}, A_s : Taux d'ondulations maximum au sein de la bande atténuée

A_f : facteur de forme

ϵ_r : Constante relative à l'ondulation de la réponse du filtre de Tchebychev II.

N_p : Ordre du filtre

S_{21} : Paramètre S qui décrit la perte d'insertion.

S_{11} : Paramètre S qui décrit les pertes par réflexion.

Introduction générale

Introduction générale

L'année 2020 constitue un échéancier important pour le déploiement de plusieurs services relatifs aux technologies de l'information et de la communication. Parmi ces services, l'internet des objets (*Internet of Things : IoT*) qui a bénéficié d'un intérêt particulier de la part des industriels ou même académiques. En effet, l'IoT se présente comme un marché très prometteur d'environ 157.05 Billions de Dollars à l'horizon 2021. En outre, la 5^{ème} génération de la radio mobile connaîtra aussi un déploiement très prochain et va servir comme réseau de base pour l'IoT. Aussi, une thématique très intéressante qui se présente est le concept de l'INDUSTRIE 4.0 qui va bouleverser les différents secteurs industriels en leur octroyant une certaine intelligence et autonomie.

Un constat très important mérite d'être signalé par rapport à toutes ces technologies, est le fait qu'elles utilisent la communication sans-fil comme moyen d'interconnexion ou networking. A cet effet, la filière de la conception des modules de communication radiofréquence (RF) sera fortement sollicitée pour répondre à ce besoin croissant. Cependant, ces modules RF seront soumis à des spécifications sévères en termes de consommation de puissance, haute performance et un taux d'intégration important doit être achevé. Afin de répondre à ces exigences les concepteurs de circuits RF doivent faire usage de technologies monolithiques, en particulier la technologie CMOS qui offre une capacité d'intégration remarquable et une implémentation de circuits intégrés à faible consommation à condition qu'une conception adéquate soit réalisée.

En effet, l'établissement d'une communication RF est conditionnée par l'allocation d'un spectre de fréquence bien précis qui doit être respecté par les infrastructures déployées et par conséquent par la circuiterie des modules RF permettant d'établir une telle communication. Ainsi, ces modules RF, appelés aussi Front-end, doivent être dotés de filtres leur permettant de sélectionner les fréquences.

Les filtres se présentent en effet comme un élément incontournable dans les systèmes de communication sans fil en raison de leur fonction intrinsèque de sélection de fréquences. Ceci a été déjà constaté à l'époque de la deuxième guerre mondiale et leur place ne cesse d'être confirmée. La convergence technologique implémentée sur nos téléphones mobiles n'aurait jamais pu voir le jour sans les filtres et les dispositifs multistandards n'auraient jamais pu être développés. Ce qui confirme encore plus l'importance de la fonction de filtrage.

L'une des technologies les plus prometteuses pour les applications de transmission sans fil haut débit et qui fait appel aux filtres microondes est la technologie UWB (*Ultra Wide band*). Cette dernière s'annonce comme un candidat privilégié pour un déploiement visant les réseaux WPAN (*Wireless Personal Area Network*) et ce, grâce aux caractéristiques très intéressantes qu'elle présente, notamment, en terme de bande passante très large qui s'étale de 3.1 GHz à 10.6 GHz. Cependant, ces performances sont offertes au prix d'un nombre d'exigences plus sévères qui ont été particulièrement reportées aux filtres microondes, connus dans ce cas sous le nom de filtre passe-bande ultra large bande (FPB ULB/UWB).

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans l'axe de la conception de filtres passe-bande ultra large bande répondant au standard UWB

Pour cela, dans le premier chapitre, une brève description de la technologie UWB sera introduite en précisant ses avantages, ses caractéristiques ainsi que ses champs d'applications. Ceci permettra de connaître mieux les spécifications du filtrage UWB, et par conséquent, d'établir un cahier des charges qui servira comme référence aux travaux de conception réalisés dans cette thèse. Cette étude nous permettra de constituer une base solide qui nous servira dans la conception niveau Système du circuit envisagé.

Le deuxième chapitre portera sur la conception de filtres UWB passe-bande, en commençant par exposer la méthode des pertes d'insertion et les différentes fonctions d'approximations utilisées pour la synthèse des filtres LC. Finalement, l'implémentation du circuit électrique pour les filtres passe-bande UWB

Chapitre 1

Notions sur la Technologie

UWB

1.1. Introduction

L'engouement pour des nouvelles technologies de communications sans-fil ne cesse d'augmenter. De plus en plus, les chercheurs, tant dans le domaine académique qu'industriel, tentent d'apporter leurs contributions en proposant des solutions dotées d'interfaces flexibles offrant aux utilisateurs des communications à haut débit avec une certaine mobilité. Parmi les technologies émergentes qui sont en concurrence pour se positionner dans les réseaux de communication sans-fil modernes, la technologie ultra-large-bande qui reste parmi les plus prometteuses. Plus connue sous l'acronyme anglais UWB (*Ultra-Wide Band*), cette technologie, vu son spectre de fréquences de 3.1 à 10.6 GHz va être de plus en plus convoité depuis que le *Federal Communications Commission* (FCC) des états unis a annoncé en 2002 qu'il sera destiné à une utilisation sans licence [1].

La technologie UWB se présente comme perspective de haut niveau pour stimuler les applications sans-fil à haut débit et ce, grâce aux caractéristiques remarquables qu'elle présente. Cependant, l'une des contraintes majeures rencontrées lors du déploiement de cette technologie, reste le problème lié aux interférences. A cause de leur très large bande passante de 7.5 GHz, les systèmes UWB sont contraints de partager partiellement cette bande passante avec des signaux d'autres systèmes de communication sans-fil. A cet effet, les systèmes UWB sont soumis à des exigences drastiques afin de pallier à ces interférences. Ces exigences font des filtres un élément incontournable dans tout récepteur UWB.

Dans ce contexte, un aperçu préliminaire sur la technologie UWB est une étape indispensable pour cerner les avantages de la technologie UWB ainsi que ses champs d'application.

L'objectif est de comprendre les problèmes d'interférence rencontrés et par conséquent, établir un cahier de charges qui servira comme référence pour les travaux présentés dans ce document.

1.2. Avantages de la UWB

Grâce aux caractéristiques remarquables de la technologie UWB, une opportunité sans précédent est offerte au développement de communications sans-fil dans leur couche physique. Parmi ces caractéristiques, nous pouvons citer :

• Une relative simplicité des systèmes

Dans les systèmes UWB, l'information en bande de base peut moduler directement des impulsions courtes (de l'ordre de quelques nanosecondes) au lieu d'une onde sinusoïdale [2]. Ce type de modulation permet de concevoir des émetteurs ne comprenant aucun synthétiseur à boucle à verrouillage de phase, ni VCO, ni mélangeur, ni amplificateur de puissance gourmand en consommation DC. Aussi, l'architecture d'un tel émetteur semble relativement simple. On peut donc s'attendre à la réalisation de systèmes UWB avec des coûts largement compétitifs par rapport aux systèmes à bande étroite.

• Faible consommation d'énergie

La consommation d'énergie a toujours constitué un problème majeur pour les systèmes de communication sans-fil. Des dispositifs à faible consommation d'énergie sont toujours recommandés. Grâce à l'architecture des systèmes UWB, une faible énergie de transmission est requise (environ 1.0 mW), ce qui en fait d'excellents candidats pour les dispositifs radio mobiles à faible consommation [3].

- **Diminution des interférences**

Les pulsations de courte durée du signal UWB conduisent vers une faible densité d'énergie sur un très large spectre de 7.5GHz. Ceci réduit les interférences avec les autres systèmes radio lors de l'émission [3]. Néanmoins, cette caractéristique peut présenter un inconvénient au niveau de la réception, puisqu'un signal avec une densité d'énergie relativement faible peut être vulnérable aux signaux de systèmes à bande étroite dont la puissance est généralement plus élevée [3].

- **Débit très élevé**

L'utilisation de systèmes à modulation temporelle dans une bande passante aussi large permet un taux de transfert de données qui varie entre 500Mbps et 1Gbps. Ceci augmente considérablement le nombre d'utilisateurs comparativement aux systèmes de communications à bande étroite [4].

- **Immunité aux multi-trajets**

Dans les canaux de propagation habituels, les systèmes à bande étroite souffrent de l'évanouissement lié aux trajets multiples qui se combinent de manière destructive. L'ultra large bande offre une énorme diversité en fréquence qui rend le signal UWB résistant aux propagations multi-trajets, ce qui est fortement recommandé dans les zones urbaines [2].

- **Propriétés de pénétration des obstacles**

Les signaux UWB offrent de bonnes capacités de pénétration dans les murs et les obstacles, en particulier pour les fréquences basses du spectre. Cette propriété permet de bénéficier d'une bonne précision en termes de localisation, permettant ainsi le développement de systèmes radar de vision à travers les murs [4].

- **Communications protégées**

Les signaux UWB sont par nature difficiles à détecter. En effet, ils sont étalés sur une large bande et transmis à des niveaux de densité spectrale de puissance proches du niveau de bruit des récepteurs de radiocommunication classiques [4]. Cette propriété octroie aux systèmes UWB deux caractéristiques intéressantes pour les communications sécurisées, à savoir, une faible probabilité de détection (LDP - *Low Detection Probability*) et une faible probabilité d'interception (LPI - *Low Probability of Interception*) [5].

1.3. UWB dans les réseaux WPAN

Les applications de l'UWB dans les réseaux sont regroupées selon leurs applications en deux catégories : communication à haut débit, communication à bas débit

1.3.1. Communication à haut débit HDR (*High-Data-Rate*)

Cette catégorie est généralement présente dans les ordinateurs, les dispositifs électroniques grand public, les terminaux mobiles ou autres dispositifs qu'on trouve dans les réseaux domestiques. La particularité de cette catégorie est qu'elle permet un taux de transfert de données très élevé (qui varie entre 1Mbps et 1Gbps) pour une portée réduite de 10 à 20 mètres [5]. Pour être plus précis, les applications HDR peuvent être décomposées selon les quatre groupes suivants :

- Le transfert de fichiers dans les applications point-à-point (P2P) où on trouve deux hôtes seulement dans la communication.
- Les communications asynchrones. Le mot asynchrone signifie que l'échange est continu et irrégulier, c.-à-d. que la liaison reste maintenue mais les fichiers sont transférés par blocs de données [5]. Un clavier ou un moniteur sans fil sont un bon exemple.
- Le vidéo streaming qui est un transfert vidéo en temps réel. Ce transfert s'effectue entre un dispositif de stockage et un dispositif d'affichage.
- L'audio streaming qui opère de la même manière que le vidéo streaming mais avec un taux de transfert moins important.

1.3.2. Communication bas débit LDR (*Low-Data-Rate*)

Lorsqu'on parle de communication LDR, on cible toute application pratique de réseaux de capteurs [5], indispensables pour la mise en œuvre du concept de villes intelligentes basé à son tour sur le concept d'internet des objets (*Internet of Things*). Ces applications requièrent un transfert de petits volumes de données entre les éléments du réseau. Dans ce genre d'applications, l'UWB reste une des technologies privilégiées car au vu du nombre important d'équipements déployés ; sa faible consommation d'énergie étant un paramètre critique à considérer

1.4. Spécifications de filtrage UWB dans les réseaux WPAN

Le FCC en Amérique du nord a défini différents masques en fonction de l'application des équipements UWB en indoor ou en outdoor (Figure 1.1). Le masque du spectre pour les dispositifs outdoor est atténué de 10 dB par rapport à celui des dispositifs indoor dans la bande 1.61-3.1 GHz et au-delà de 10.6 GHz.

Le tableau 1.1 présente la puissance isotrope rayonnée équivalente EIRP (*Equivalent isotropically radiated power*) [6] pour ces deux types de dispositifs.

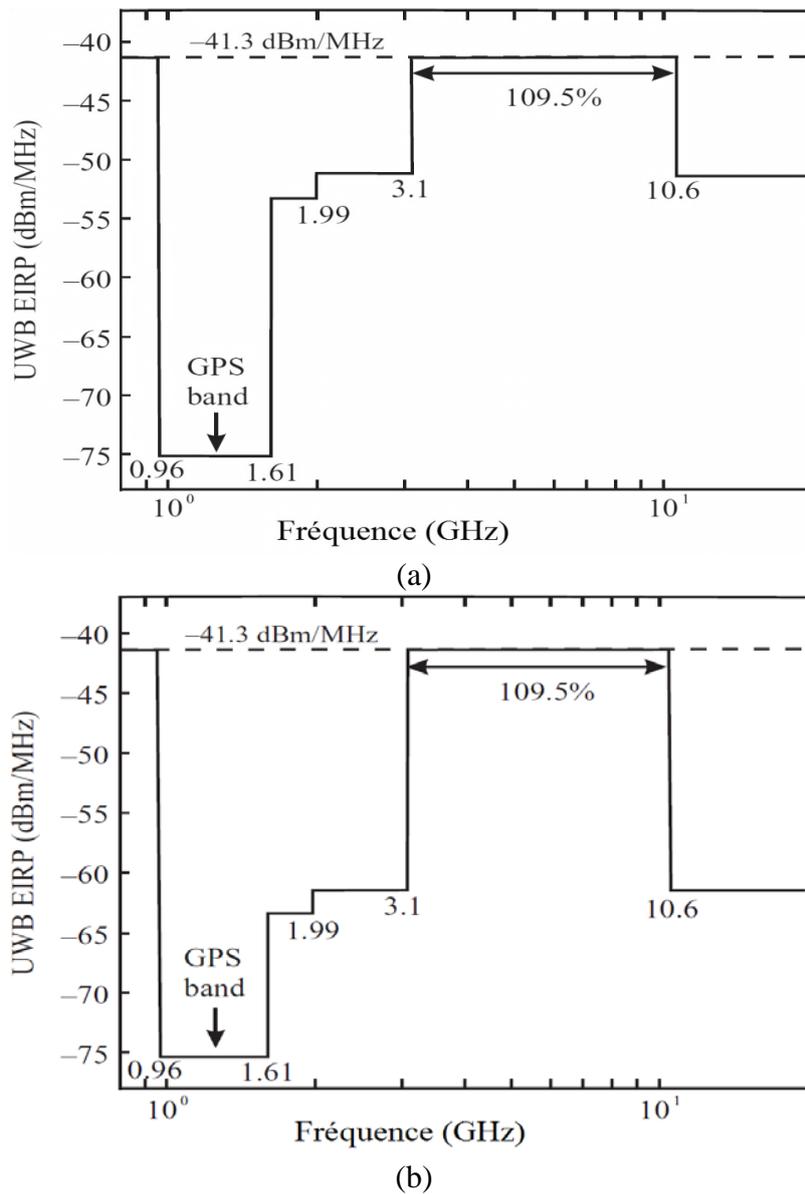


Figure 1. 1: Définition de FCC relative aux masques UWB. (a) Indoor. (b) Outdoor [6]

Tableau 1. 1 Définition du FCC des masques d'émission Indoor et Outdoor des systèmes UWB [6]

Bande de fréquences (MHz)	Indoor EIRP (dBm/MHz)	Outdoor EIRP (dBm/MHz)
960-1610	-75.3	-75.3
1610-1990	-53.3	-63.3
1990-3100	-51.3	-61.3
3100-10600	-41.3	-41.3
Plus de 10600	-51.3	-61.3

1.5. Filtrage UWB

Les exigences en termes de filtrage UWB diffèrent en fonction de l'application visée par le système UWB. L'application qui a bénéficié du plus grand intérêt et sans aucun doute celle des réseaux WPAN [6] vu que les propriétés de l'UWB sont bien adaptées à cette dernière. Cette application est régie par les deux standards *IEEE 802.15.4a* pour les réseaux WPAN à faible taux de transfert et *IEEE 802.15.3a* pour les réseaux WPAN à haut taux de transfert [7]. Le cahier des charges qui se résume dans les points suivants [3], [6] :

- Le filtre doit être du type passe-bande bénéficiant d'une très large bande passante qui s'étale de 3.1 GHz à 10.6 GHz.
- La courbe de réponse du filtre doit être constante sur toute la bande passante avec un minimum de pertes d'insertion et ondulations.
- Le filtre doit présenter une sélectivité suffisamment élevée lui permettant d'éliminer les interférences avec les systèmes évoluant dans les fréquences adjacentes, notamment le 1.6 GHz du GPS (*Global Positioning System*), le 1.9 GHz des systèmes PCS (*Personal Communication Services*) et le 2.4 GHz des périphériques Bluetooth.
- En fonction du module de la fonction de transfert, $|S_{21}|$, une réponse sélective doit répondre aux spécifications suivantes :
 - une atténuation de 10 dB minimum dans la bande 1.9-3.1 GHz et pour les fréquences supérieures à 10.6 GHz,
 - une atténuation de 34 dB minimum pour les fréquences inférieures à 1.9 GHz.
 - L'aspect mécanique est d'une grande importance dans la conception des filtres passe-bande UWB. A cet effet, un circuit léger et compact est fortement recommandé.

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement introduit la technologie UWB puis présenté ses avantages et champs d'applications. Au vu des caractéristiques qu'elle présente, la technologie UWB est particulièrement bien adaptée pour les réseaux WPAN qui sont régis par les standards *IEEE 802.15.4a* et *IEEE 802.15.3a*.

Dans ce cadre, en vue de répondre aux exigences du filtrage UWB, un cahier de charges a été élaboré en se basant sur les régulations du FCC. Ce cahier de charge constituera une référence pour le travail qui sera présenté dans la suite de ce document.

Chapitre 2

Synthèse des filtres UWB

2.1. Introduction

La demande croissante de systèmes SoC a poussée à la miniaturisation des filtres UWB en utilisant les technologies monolithiques. Cela se fait à travers les deux étapes suivantes, la première est la conception d'un model électrique qui détermine les performances du filtre et la deuxième étape est l'implémentation du circuit électrique conçu à l'aide d'une technologie monolithique spécifique

Dans ce chapitre, nous allons aborder la première étape de conception à savoir la synthèse des circuits électriques des filtres que nous allons proposer ; à cet effet, nous ferons appel à la méthode des pertes d'insertion avec les fonctions de filtrage Tchebychev inverse et elliptique

2.2. Synthèse des filtres par la méthode des pertes d'insertion

La méthode des pertes d'insertion est basée sur le calcul des caractéristiques prédéfinies Des filtres composés par des éléments de circuits linéaires, passifs, localisés et finis. Cette Méthode est la méthode la plus utilisée pour la conception des filtres [4].

Dans cette méthode des pertes d'insertion, la réponse d'un filtre est d'abord représentée Par sa fonction de transfert, qui a pour forme [8] :

$$|S_{21}(j\omega)|^2 = 1 + \frac{M(\omega^2)}{N(\omega^2)} \quad (2.1)$$

La fonction est exprimée en fonction de ω où M et N sont des polynômes réels qui dépendent de la fonction d'approximation à laquelle sera assimilée la fonction de transfert.

Ensuite nous passons par les étapes suivantes de conceptions pour aboutir au circuit du filtre voulu :

- Etablissement du prototype passe-bas

Il est possible de regrouper les fonctions de filtrage en deux grandes catégories. La première est celle des fonctions du type *all-pole*, elle est appelée ainsi car sa fonction de transfert ne contient que des solutions du dénominateur (pôles). Elle renferme des approximations de type Butterworth, Tchebychev I, Bessel, Gauss, et Legendre. La deuxième catégorie regroupe les fonctions du type *zéro-pole* et contient les approximations de type Tchebychev II, Elliptique et Hourglass ; dans ce cas la fonction de transfert présente des solutions pour le numérateur et le dénominateur.

La topologie utilisée pour une fonction zéro-pole est celle de la figure 2.1, il faut toujours choisir le circuit qui contient le minimum de bobines pour minimiser l'encombrement lors de l'implémentation.

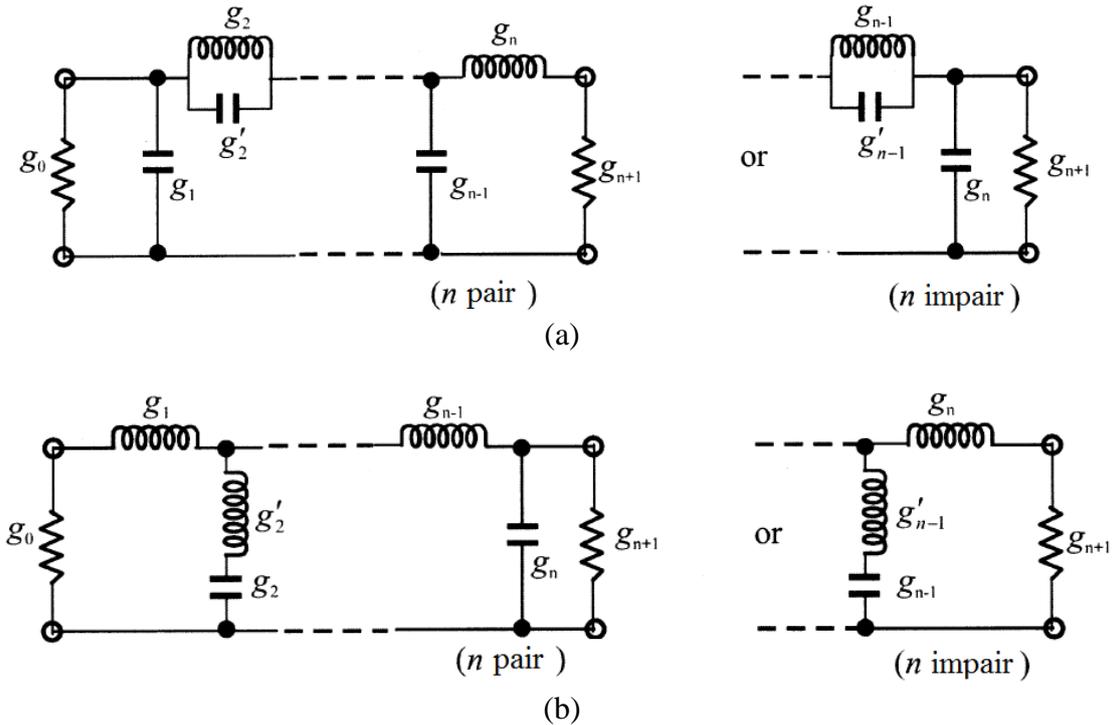


Figure 2. 1 : Circuits prototype du filtre passe-bas pour les fonctions de filtrage zéro-pole. (a) commençant par une capacité parallèle. (b) commençant par une inductance série [4].

- **Calcul des valeurs des éléments normalisés du prototype**

Pour cela nous utilisons soit les formules relatives à la fonction de filtrage retenue, soit des tableaux fournis dans la littérature qui contiennent des valeurs normalisées pour différents cas de spécifications techniques.

En général, les éléments g_i du circuit du filtre prototype sont normalisés par rapport à l'impédance de source ($g_0 = 1$) et à la pulsation de coupure ($\omega_c = 1$). Dans la plupart des cas, l'impédance de charge est supposée égale à l'impédance de source (ce qui est le cas ici) d'où $g_{n+1} = g_0 = 1$. Les valeurs de ses éléments normalisés g_i varient en fonction de la fonction de filtrage utilisée.

A titre d'exemple, les valeurs des éléments normalisés pour Butterworth 6 :
 $g_0 = g_7 = 1, g_1 = 0.5176, g_2 = 1.4142, g_3 = 1.9319, g_4 = 1.9319, g_5 = 1.4142, g_6 = 0.5176$.

- **Transformation de fréquence et d'impédance**

Redimensionner le prototype passe-bas normalisé vers les largeurs de bande UWB c.-à-d. une fréquence de coupure $f_c = 3.1 \text{ GHz}$ (fréquence de coupure inférieure du spectre UWB) et vers le niveau d'impédance $Z = 50 \Omega$.

$$FSF = 2\pi \cdot 3.1 \text{ GHz}, \text{ facteur de dénormalisation en fréquence} \tag{2.2}$$

$$R_s = R_L = g_0 \cdot Z = 50 \Omega, \text{ facteur de dénormalisation en impédance} \tag{2.3}$$

$$C_i = \frac{g_i}{FSF \cdot Z} \tag{2.4}$$

$$L_i = \frac{g_i \cdot Z}{FSF} \quad (2.5)$$

Avec C_i et L_i sont les valeurs dénormalisées des capacités et inductances. Le circuit résultant pour l'exemple qu'on a pris est illustré à la figure 2.2(a).

- Transformation du filtre passe-bas en filtre passe-bande

On obtient le filtre passe-bande en faisant résonner chaque capacité avec une bobine parallèle et chaque bobine avec une capacité série à la fréquence centrale UWB, à savoir, $f_0=6.85\text{GHz}$. Les valeurs des éléments ajoutés, C'_i et L'_i , sont calculés par :

$$C'_i = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_i} \quad (2.6)$$

$$L'_i = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_i} \quad (2.7)$$

Le circuit final du filtre passe-bande UWB de l'exemple qu'on a pris est illustré à la figure 2.2(b)

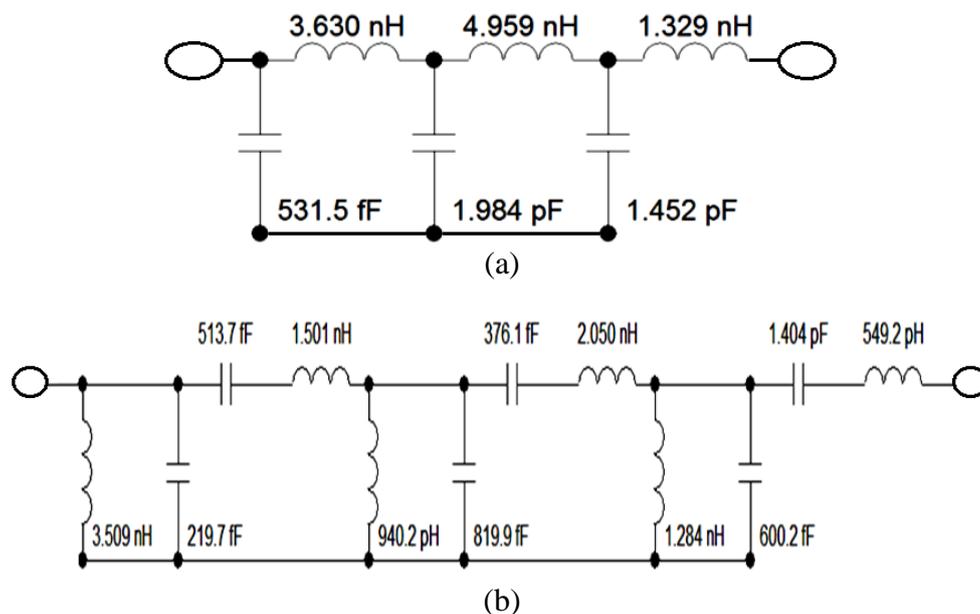


Figure 2. 2 : (a) Circuit du filtre passe-bas de Butterworth N=6 après dénormalisation. (b) Circuit du filtre passe-bande UWB de Butterworth N=6.

2.3. Fonctions de filtrage

Il existe différentes fonctions de filtrage qui peuvent être utilisées dans la conception des filtres UWB passe bande à savoir, Bessel, Butterworth, Chebyshev 1, Chebyshev 2 (Chebyshev inverse), Legendre, Elliptique et Hourglass

Afin de déterminer les fonctions d'approximations la plus adéquate pour le filtrage UWB, une étude comparative de ces différentes fonctions d'approximations a été faite dans [9], les fonctions les plus adaptés sont celles de Tchebychev 2, elliptique et Hourglass.

Nous allons implémenter un filtre elliptique d'ordre 4 et un filtre de Tchebychev 2 d'ordre 4, la topologie du prototype passe bas et de son circuit dual pour ces deux filtre est montré dans la figure 2.3

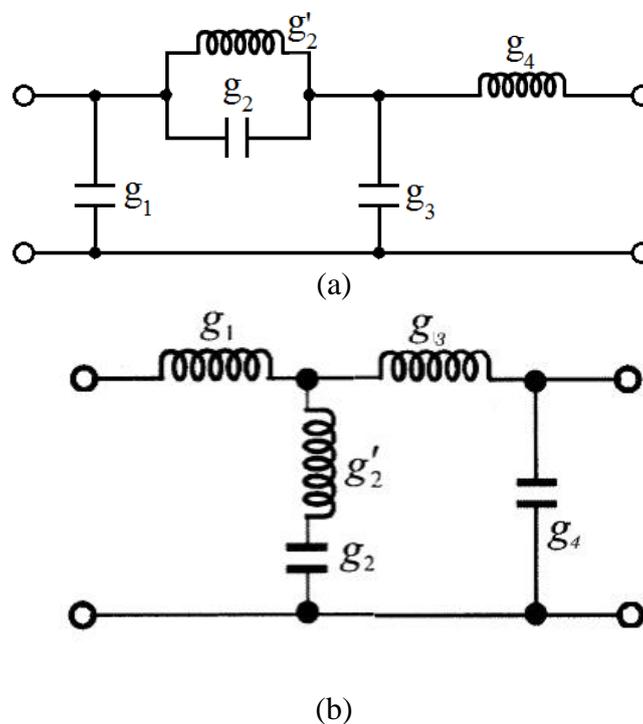


Figure 2. 3 : Circuits prototype du filtre passe-bas d'ordre 4. (a) commençant par une capacité parallèle. (b) commençant par une inductance série.

Filtre de Chebyshev

L'approximation de Tchebychev II présente une réponse avec une bande passante plate et une bande atténuée contenant des ondulations causées par les zéros de transmission de la fonction de transfert [10].

Ces filtres ont été développés pour faire un compromis entre une réponse raide et pointue et un retard de groupe constant, d'où le nom par lequel ils sont souvent désignés : *réponse de Tchebychev avec retard de groupe constant*.

Quelles que soient les spécifications exigées en termes d'amplitude de la réponse, l'ordre requis pour un filtre de Tchebychev II est le même que pour un filtre de Tchebychev I.

Cependant, l'avantage d'utiliser le type II nous permet de bénéficier d'une amélioration de la phase, donc des propriétés temporelles.

Les valeurs des éléments du prototype de Tchebychev sont données par les formules suivantes [10] :

$$g_i = 2\eta \sin \left[\frac{(2i-1)\pi}{2N} \right] \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$\text{Où } \eta = \sinh \frac{1}{N \sinh^{-1}(1/\varepsilon_i)} \quad \varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{10^{\frac{A_s}{10}} - 1}} \quad (2.8)$$

$$g_i' = \frac{\omega_c}{\beta_k^2 L} \quad \text{avec}$$

$$\beta_k = \frac{1}{\cos U_k} \quad U_k = \frac{(2k-1)\pi}{2N} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2.9)$$

Filtre Elliptique

La fonction d'approximation elliptique ou de Caer fournit la meilleure sélectivité parmi toutes les méthodes d'approximation discutées jusqu'ici.

Ces filtres ont pour propriété d'avoir l'ordre le plus bas parmi les filtres classiques pour répondre à un cahier de charge spécifique.

Et pour réussir cet exploit, ces filtres combinent des ondulations dans la bande passante comme celle du filtre de Tchebychev I et des ondulations dans la bande atténuée comme celles du filtre de Tchebychev II. [11]

Contrairement aux filtres de Butterworth et Tchebychev, il n'y a pas de formule simple pour calculer les éléments du prototype des filtres elliptiques.

Cependant, nous pouvons profiter des travaux qui ont regroupé dans des tableaux, les valeurs des éléments pour les cas les plus utilisés par les concepteurs de filtres [12].

Tableau 2. 1 : Les valeurs des éléments du prototype passe-bas du filtre elliptique [12].

n	A_f	L_{As} dB	g_1	g_2	g'_2	g_3	g_4	g'_4	g_5	g_6	g'_6	g_7
3	1.4493	13.5698	0.7427	0.7096	0.5412	0.7427						
	1.6949	18.8571	0.8333	0.8439	0.3252	0.8333						
	2.0000	24.0012	0.8949	0.9375	0.2070	0.8949						
	2.5000	30.5161	0.9471	1.0173	0.1205	0.9471						
4	1.2000	12.0856	0.3714	0.5664	1.0929	1.1194	0.9244					
	1.2425	14.1259	0.4282	0.6437	0.8902	1.1445	0.9289					
	1.2977	16.5343	0.4877	0.7284	0.7155	1.1728	0.9322					
	1.3962	20.3012	0.5675	0.8467	0.5261	1.2138	0.9345					
	1.5000	23.7378	0.6282	0.9401	0.4073	1.2471	0.9352					
	1.7090	29.5343	0.7094	1.0688	0.2730	1.2943	0.9348					
	2.0000	36.0438	0.7755	1.1765	0.1796	1.3347	0.9352					
5	1.0500	13.8785	0.7081	0.7663	0.7357	1.1276	0.2014	4.3812	0.0499			
	1.1000	20.0291	0.8130	0.9242	0.4934	1.2245	0.3719	2.1350	0.2913			
	1.1494	24.5451	0.8726	1.0084	0.3845	1.3097	0.4991	1.4450	0.4302			
	1.2000	28.3031	0.9144	1.0652	0.3163	1.3820	0.6013	1.0933	0.5297			
	1.2500	31.4911	0.9448	1.1060	0.2694	1.4415	0.6829	0.8827	0.6040			
	1.2987	34.2484	0.9681	1.1366	0.2352	1.4904	0.7489	0.7426	0.6615			
	1.4085	39.5947	1.0058	1.1862	0.1816	1.5771	0.8638	0.5436	0.7578			
	1.6129	47.5698	1.0481	1.2416	0.1244	1.6843	1.0031	0.3540	0.8692			
	1.8182	54.0215	1.0730	1.2741	0.0919	1.7522	1.0903	0.2550	0.9367			
	2.000	58.9117	1.0876	1.2932	0.0732	1.7939	1.1433	0.2004	0.9772			
6	1.0500	18.6757	0.4418	0.7165	0.9091	0.8314	0.3627	2.4468	0.8046	0.9986		
	1.1000	26.2370	0.5763	0.8880	0.6128	0.9730	0.5906	1.3567	0.9431	1.0138		
	1.1580	32.4132	0.6549	1.0036	0.4597	1.0923	0.7731	0.9284	1.0406	1.0214		
	1.2503	39.9773	0.7422	1.1189	0.3313	1.2276	0.9746	0.6260	1.1413	1.0273		
	1.3024	43.4113	0.7751	1.1631	0.2870	1.2832	1.0565	0.5315	1.1809	1.0293		
	1.3955	48.9251	0.8289	1.2243	0.2294	1.3634	1.1739	0.4148	1.2366	1.0316		
	1.5962	58.4199	0.8821	1.3085	0.1565	1.4792	1.3421	0.2757	1.3148	1.0342		
	1.7032	62.7525	0.9115	1.3383	0.1321	1.5216	1.4036	0.2310	1.3429	1.0350		
	1.7927	66.0190	0.9258	1.3583	0.1162	1.5505	1.4453	0.2022	1.3619	1.0355		
	1.8915	69.3063	0.9316	1.3765	0.1019	1.5771	1.4837	0.1767	1.3794	1.0358		
7	1.0500	30.5062	0.9194	1.0766	0.3422	1.0962	0.4052	2.2085	0.8434	0.5034	2.2085	0.4110
	1.1000	39.3517	0.9882	1.1673	0.2437	1.2774	0.5972	1.3568	1.0403	0.6788	1.3568	0.5828
	1.1494	45.6916	1.0252	1.2157	0.1940	1.5811	0.9939	0.5816	1.2382	0.5243	0.5816	0.4369
	1.2500	55.4327	1.0683	1.2724	0.1382	1.7059	1.1340	0.4093	1.4104	0.7127	0.4093	0.6164
	1.2987	59.2932	1.0818	1.2902	0.1211	1.7478	1.1805	0.3578	1.4738	0.7804	0.3578	0.6759
	1.4085	66.7795	1.1034	1.3189	0.0940	1.8177	1.2583	0.2770	1.5856	0.8983	0.2770	0.7755
	1.5000	72.1183	1.1159	1.3355	0.0786	1.7569	1.1517	0.3716	1.6383	1.1250	0.3716	0.9559
	1.6129	77.9449	1.1272	1.3506	0.0647	1.8985	1.3485	0.1903	1.7235	1.0417	0.1903	0.8913
	1.6949	81.7567	1.1336	1.3590	0.0570	1.9206	1.3734	0.1675	1.7628	1.0823	0.1675	0.9231
	1.8182	86.9778	1.1411	1.3690	0.0479	1.9472	1.4033	0.1408	1.8107	1.1316	0.1408	0.9616

2.5. Critères d'évaluation des filtres

Afin d'évaluer les performances des filtres passe-bande UWB, nous nous baserons sur les critères d'évaluation suivants, cités par ordre de priorité :

1. La largeur de la bande passante :

Un filtre performant est celui qui couvre la totalité de la bande passante spécifiée dans le cahier de charge.

2. La sélectivité :

Plus la sélectivité est grande plus le filtre sera performant. Une grande sélectivité se manifeste par la netteté des bords, cela veut dire que les coupures ne sont pas graduelles mais au contraire très discontinues.

3. La raideur :

Une réponse raide signifie que le filtre présente une atténuation brutale dans ces bandes rejetées, ceci peut être évalué à l'aide du facteur de forme.

4. Platitude de bande passante :

La réponse du filtre doit être constante sur toute la bande passante et ne doit pas tolérer des ondulations élevées.

5. Le coefficient de réflexion S_{11} :

Plus les valeurs de ce coefficient sont faibles dans la bande passante et plus le filtre sera adapté et donc performant. Et plus ces valeurs sont élevées dans les bandes atténuées et plus la réjection est importante pour ces dernières.

6. Le nombre d'éléments du filtre :

Ce nombre est directement relié à l'ordre du filtre. Pour le filtre passe-bande c'est le double. Plus ce nombre est faible plus l'implémentation devient facile et par conséquent le coût moins élevé.

2.5. Implémentations des filtres choisis

Nous avons calculé les paramètres des filtres retenues à l'aide des équations (2.8) (2.9) et du tableau 2.1. Les résultats de calculs sont exposés dans le tableau 2.2

Tableau 2. 2 : Valeurs des éléments des filtres pour les deux fonctions Tchebychev 2 et Elliptique d'ordre 4

	Tchebychev	Elliptique
g_1	0.6755	0.3714
g_2	1.410	0.5664
g'_2	0.5349	1.0929
g_3	1.022	1.1194
g_4	0.2877	0.9244
L_a	649.6 pH	127 pH
L_b	1.726 nH	2.851 nH
C_a	1.386 pF	6.069 pF
C_b	441 fF	270.4 fF
L_{11}	5.239 nH	4.910 nH
C_{11}	643.7 fF	682.1 fF
L_{12}	1.182 nH	1.130 nH
C_{12}	145.3 fF	157 fF
L_{13}	1.295 nH	1.364 nH
C_{13}	587.6 fF	585.3 fF

Nous avons ensuite implémenté ces deux filtres sur l'outil CAO ADS et nous les avons simulés grâce à l'analyse S-paramètres comme il est montré dans les figures 2.4 et 2.5.

Les réponses du module S11 et S21 des deux circuits sont tracées dans les figures 2.6 et 2.7 respectivement

De ces figures nous pouvons remarquer que les filtres retenues satisfont les exigences UWB, les fréquences de coupures sont respectées (3.1 – 10.6 GHz), une bonne platitude dans la bande de travail, $|S_{11}| < 10$ dB ce qui signifie une adaptation d'impédances et finalement des lobes secondaires atténués et donc suppression des interférences

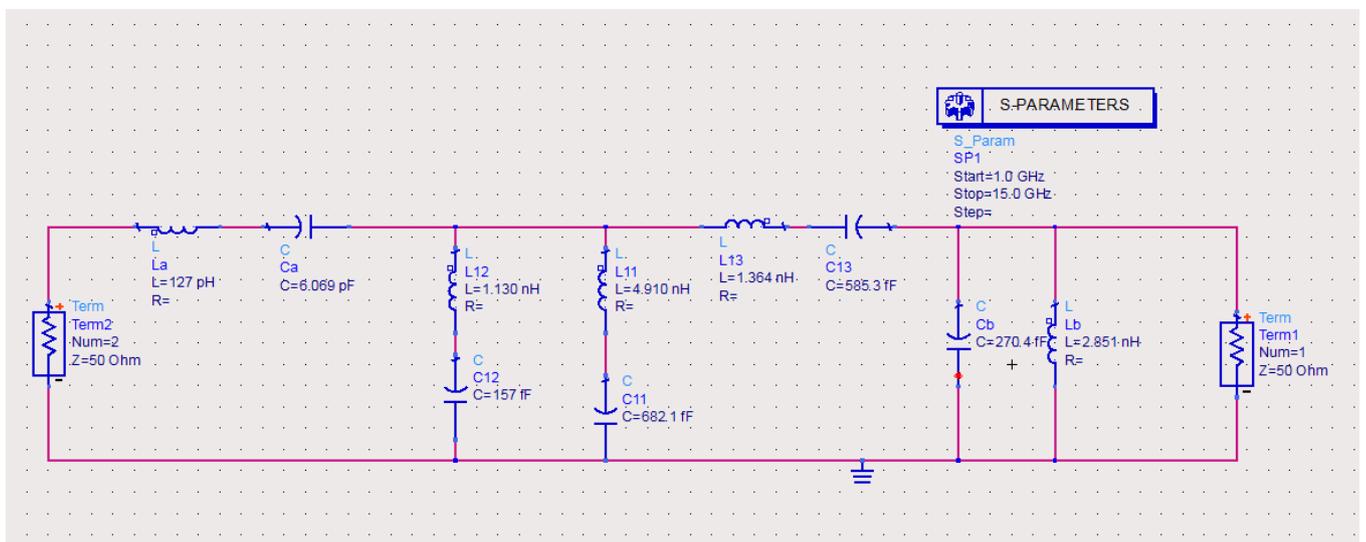


Figure 2. 4 : Schéma électrique du FFB UWB en utilisant Tchebychev 2 d'ordre 4

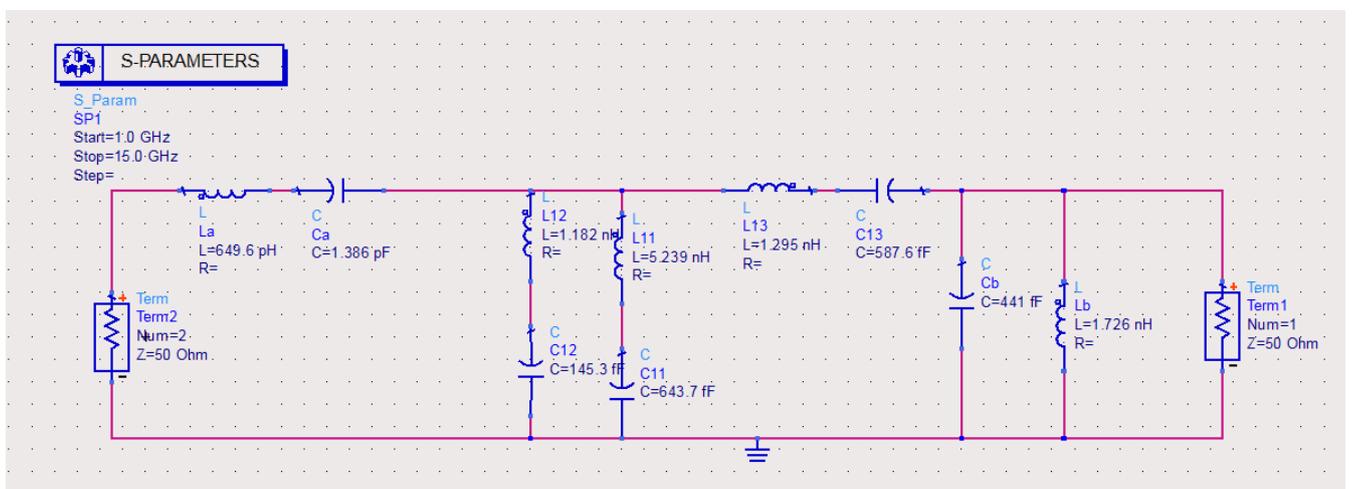


Figure 2. 5 : Schéma électrique du FFB UWB en utilisant elliptique d'ordre 4

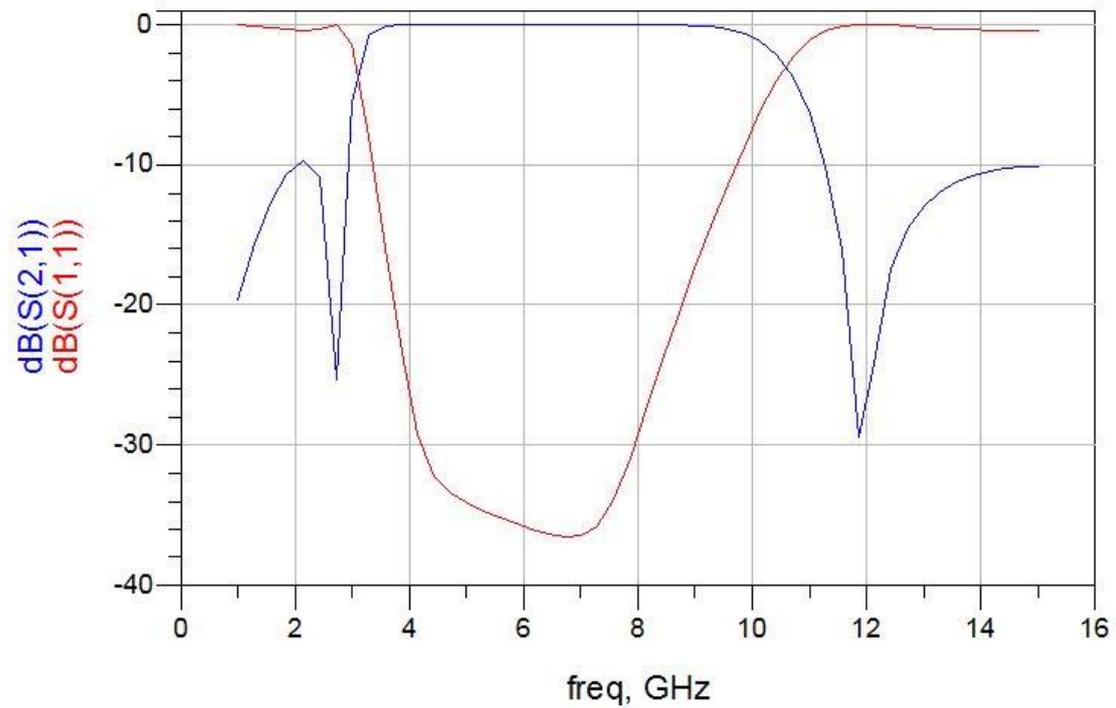


Figure 2. 6 : Caractéristiques du filtre passe-bande UWB en utilisant Tchebychev 2 d'ordre 4

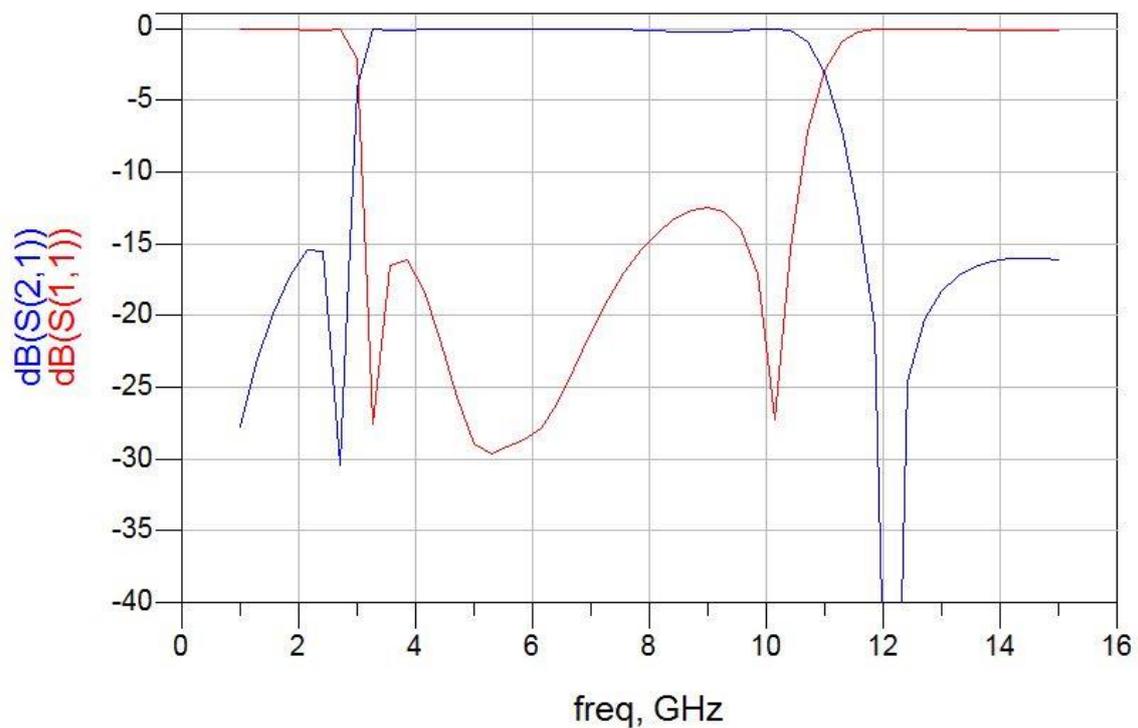


Figure 2. 7 : Caractéristiques du filtre passe-bande UWB en utilisant elliptique d'ordre 4

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé la synthèse de filtre UWB passe bande. Nous avons exposé la méthode de conception à perte d'insertion qui est la plus utilisée pour la conception des filtres et les fonctions d'approximations de Chebyshev 2 et Elliptique vu qu'elles sont les plus adaptées au filtrage UWB.

Dans un second temps nous avons implémenté un filtre Chebyshev et elliptique d'ordres 4 à l'aide des formules présentées ci-avant. La validation de la conception a été effectuée en utilisant l'outil de CAO ADS.

Les résultats de simulation ont montré de bonnes performances pour les deux filtres implémentés.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail mené dans ce document nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine du filtrage des signaux ainsi que dans la théorie de conception des circuits électriques.

De plus, une compréhension plus profonde de la technique de transmission *UWB* a été acquise ainsi qu'une relative maîtrise de l'outil CAO *ADS*

Ainsi lors de la conception nous avons ciblé la technologie *UWB* appliquée aux réseaux *WPAN*, et nous avons procédé selon les étapes suivantes :

Dans un premier temps, introduit la technologie *UWB* puis présenté ses avantages et champs d'applications. Au vu des caractéristiques qu'elle présente, la technologie *UWB* est particulièrement bien adaptée pour les réseaux *WPAN* qui sont régis par les standards IEEE 802.15.4a et IEEE 802.15.3a. Dans ce cadre, en vue de répondre aux exigences du filtrage *UWB*, un cahier de charges a été élaboré en se basant sur les régulations du FCC.

Dans un second temps, nous avons abordé la synthèse de filtre *UWB* passe bande. Nous avons exposé la méthode de conception à perte d'insertion qui est la plus utilisée pour la conception des filtres et les fonctions d'approximations de Chebyshev 2 et Elliptique vu qu'elles sont les plus adaptées au filtrage *UWB*.

En dernier lieu, nous avons implémenté un filtre Chebyshev et elliptique d'ordres 4 à l'aide des formules présentées dans le chapitre 2. La validation de la conception a été effectuée en utilisant l'outil de CAO *ADS*. Les résultats de simulation ont montré de bonnes performances pour les deux filtres implémentés

Enfin, nous mettons en perspective la réalisation de la seconde étape de la conception, à savoir l'implémentation des filtres conçus en technologie monolithique CMOS 0.18 μm

Références bibliographiques

- [1] FCC “Revision of part15 of the commission’s rules regarding ultra-wideband transmission systems”, First Note and Order, Federal Communications Commission, ET –Docket98 – 153, February14, 2002.
- [2] F.T. Talom, "Modélisation déterministe du canal de propagation Indoor dans un contexte Ultra Wide Band", Thèse doctorat, INSA, Rennes, France, 2005.
- [3] Z-C. Hao and J-S. Hong, “Ultrawideband Filter Technologies,” IEEE Microwave Magazine, vol. 11, pp. 56-68, 2010.
- [4] M. Ghavami, L.B. Michael, R. Kohno, Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering, J. Wiley & Sons, 2004.
- [5] S. Wood, R. Aiello, Essentials of UWB, Cambridge University, 2008
- [6] L. Zhu, S. Sun, and R. Li, Microwave Bandpass Filters for Wideband Communications, J. Wiley & Sons, Hoboken, 1st Edition, 2012
- [7] P.A. Catherwood and W.G. Scanlon, “Ultrawideband communications - an idea whose time has still yet to come?” IEEE Anten. Prop. Magazine, vol. 57, pp. 38-43, 2015
- [8] M. K. M. Salleh, “ Contribution à la synthese de resonateur Pseudo-Elliptiques en Anneau. Application au filtrage Planaire Millimétrique“, These de Doctorat, INPT, France, 2008.
- [9] A.A. Saadi, M.C.E. Yagoub, R. Touhami, A. Slimane, A. Taibi, and M.T. Belaroussi “The impact of filtering function on the design of CMOS ultra wideband filters,” *15th IEEE Int. Conf. on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB’15)*, Montreal, Canada, Oct. 4-7, 2015, pp. 1-4.
- [10] S. Winder, *Analog and Digital Filter Design*, 2nd Edition, Newnes, 2002.
- [11] A. A. Saadi “ Etude et conception des filtres planaires pour systèmes UWB“, thèse de Doctorat, USTHB, Alger, Algérie, 2016
- [12] J. S. Hong MJ. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, J. Wiley & Sons, 2001.