

國立交通大學

電信工程學系

碩士論文

雙頻帶雙轉換鏡像消除複數降頻器與
寬頻吉伯特混頻器設計

Dual-Band Dual-Conversion Image Rejection Complex
Down Converter and Wideband Gilbert Mixer Design

研究生：游勝文

指導教授：孟慶宗教授

中華民國 九十六 年 六 月

雙頻帶雙轉換鏡像消除複數降頻器與
寬頻吉伯特混頻器設計

Dual-Band Dual-Conversion Image Rejection Complex Down
Converter and Wideband Gilbert Mixer Design

研究生:游勝文

Student: Sheng-Wen Yu

指導教授:孟慶宗 博士 Advisor: Dr. Chin Chun Meng

國立交通大學

電信工程學系碩士班



Submitted to Department of Communication Engineering

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Science

In

Communication Engineering

June 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年六月

雙頻帶雙轉換鏡像消除複數降頻器與 寬頻吉伯特混頻器設計

學生：游勝文

指導教授：孟慶宗 博士

國立交通大學

電信工程學系碩士班

摘 要

本篇論文分為三個主題，介紹應用於無線通訊的射頻電路。第一，利用複數混頻器與複數濾波器的威福-哈特利鏡像消除降頻器，威福-哈特利鏡像消除降頻器採用了低中頻架構並設計成雙頻帶系統。第二，結合 Marchand Balun 與吉伯特混頻器得到寬頻的電路架構。第三，介紹了次諧波混頻器、頻率倍頻器、微混頻器、單正交四相位降頻器與雙正交四相位降頻器。

本篇論文主要以 TSMC 0.35 μm SiGe BiCMOS 與 TSMC 0.18 μm CMOS 製程來設計雙頻帶威福-哈特利鏡像消除降頻器。利用 TSMC 0.35 μm SiGe BiCMOS 與 TSMC 0.13 μm CMOS 製程來設計寬頻的 Marchand Balun 之混頻器。最後，利用 WIN 0.15 μm PHEMT 與 MHEMT 製程來設計高頻的混頻器。

Dual-Band Dual-Conversion Image Rejection Complex Down Converter and Wideband Gilbert Mixer Design

Student: Sheng-Wen Yu

Advisor: Chin-Chun Meng

Department of Communication Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

In this thesis , we introduce three subjects about wireless communicational RF circuits. First, Weaver-Hartley image rejection down-converter using the architecture of complex mixers and complex filters is designed to reject image signals. The Weaver-Hartley image rejection down-converter using low-IF architecture is designed to be dual-band system. Second, Marchand Balun and Gilbert mixer are combined into wideband circuits. Third, we introduce the sub-harmonic mixer , frequency doubler , micromixer , single quadrature down converter and double quadrature down converter .

The dual-band Weaver-Hartley image rejection down-converters are designed by using TSMC 0.35 μ m SiGe BiCMOS and TSMC 0.18 μ m CMOS technologies. The wideband mixers with Marchand Balun are designed by using TSMC 0.35 μ m SiGe BiCMOS and TSMC 0.18 μ m CMOS technologies. Finally, the high-frequency mixers are designed by using WIN 0.15 μ m PHEMT and MHEMT technologies.

誌謝

時光飛逝，兩年的研究所生活很快地劃下句點。在這段期間很感謝孟慶宗老師的指導，使我得以一窺射頻電路領域的深奧並讓我在學識上有所成長。並感謝郭仁財教授、鍾世忠教授與張志揚教授在百忙之餘能參加學生的口試並給予寶貴的建議，使得本論文能夠更完整而嚴謹。

在研究所期間，特別感謝博士班的宗翰、聖哲、珍儀與宏儒學長姐們，不厭其煩地教導我，帶領著我前進。此外，感謝智凱、澤宏、宇文、家宏、英杰與樺輿學長的指導，讓我對於研究和課業有更多的了解。同時要感謝實驗室的同學柏誼、冠璋與約廷的關懷與砥礪，讓我這兩年的生活充實且愉快。學弟妹們金詳、雅惠、宜蓁、威宇、揚鮮與宜珊當然也不能忘記，讓我這兩年的研究所生活充滿回憶。

我在這裡特別感謝我摯愛的父母與家人們在求學過程中給我最大的支持。最後，僅把此論文的榮耀獻給我的家人以及身邊所有關懷我的朋友們。

目錄

摘要 (中文)	i
摘要 (英文)	ii
致謝.....	iii
目錄	iv
表目錄	vii
圖目錄.....	ix
第一章 導論.....	1
1.1 研究動機.....	2
1.2 論文組織.....	2
第二章 雙頻帶威福-哈特利鏡像消除降頻器設計.....	3
2.1 前言	4
2.2 威福-哈特利鏡像消除降頻器.....	5
2.2.1 哈特利鏡像消除架構(Hartlry Architecture).....	5
2.2.2 威福鏡像消除架構(Weaver Architecture).....	6
2.2.3 威福-哈特利鏡像消除架構.....	7
2.2.4 第一鏡像消除原理.....	8
2.2.5 第二鏡像消除原理.....	11
2.2.6 第一鏡像訊號消除的數學分析.....	12
2.2.7 非理想因素對鏡像訊號消除的影響.....	15
2.3 雙頻帶威福-哈特利鏡像消除架構.....	17
2.3.1 頻率規畫.....	17
2.3.2 雙頻帶威福-哈特利鏡像消除架構系統分析.....	20
2.4 實作，2.4/5.7GHz Dual-Band Weaver-Hartley Image Rejection Down Converter(SiGe 0.35um).....	22
2.4.1 研究動機.....	22
2.4.2 系統頻率規畫.....	22
2.4.3 整體系統架構.....	25
2.4.4 電路設計.....	27
2.4.5 晶片量測結果.....	38
2.4.6 結果與討論.....	45
2.5 實作，2.4/5.7GHz Dual-Band Weaver-Hartley Image Rejection Down	

Converter(CMOS 0.18um).....	48
2.5.1 研究動機.....	48
2.5.2 系統頻率規畫.....	48
2.5.3 整體系統架構.....	48
2.5.4 電路設計.....	49
2.5.5 晶片量測結果.....	53
2.5.6 結果與討論.....	60
第三章 Marchand Balun 之混頻器設計.....	63
3.1 前言.....	64
3.2 Marchand Balun 的理論分析.....	64
3.2.1 Marchand Balun 的各種型態.....	64
3.2.2 Marchand Balun 的 S 參數分析.....	66
3.3 實作，Micromixer with Broad Band Marchand Balun(SiGe 0.35um).....	68
3.3.1 研究動機.....	68
3.3.2 電路架構與設計.....	68
3.3.3 晶片量測結果.....	73
3.3.4 結果與討論.....	77
3.4 實作，The Mixer with Marchand Balun and Interdigital Phase Inverter Rat Race(CMOS 0.13um).....	79
3.4.1 研究動機.....	79
3.4.2 電路架構與設計.....	79
3.4.3 晶片量測結果.....	80
3.4.4 結果與討論.....	85
3.5 實作，The Micromixer with Type I Marchand Balun (CMOS 0.13um).....	87
3.5.1 研究動機.....	87
3.5.2 電路架構與設計.....	87
3.5.3 晶片量測結果.....	88
3.5.4 結果與討論.....	93
3.6 實作，The Micromixer with Type IV Marchand Balun (CMOS 0.13um).....	94
3.6.1 研究動機.....	94
3.6.2 電路架構與設計.....	95
3.6.3 晶片量測結果.....	96
3.6.4 結果與討論.....	101
第四章 利用 PHEMT 與 MHEMT 製程之混頻器設計.....	103
4.1 前言.....	104
4.2 實作，Compensated Sub-Harmonic Mixer(PHEMT 0.15um).....	105
4.2.1 研究動機.....	105
4.2.2 電路架構與設計.....	105

4.2.3	晶片量測結果.....	109
4.2.4	結果與討論.....	115
4.3	實作，Compensated Frequency Doubler (PHEMT 0.15um).....	117
4.3.1	研究動機.....	117
4.3.2	電路架構與設計.....	117
4.3.3	晶片量測結果.....	121
4.3.4	結果與討論.....	124
4.4	實作，Compensated Sub-Harmonic Mixer(PHEMT 0.15um).....	125
4.4.1	研究動機.....	125
4.4.2	電路架構與設計.....	125
4.4.3	電路模擬結果.....	127
4.4.4	結果與討論.....	129
4.5	實作，Micromixer(MHEMT 0.15um).....	130
4.5.1	研究動機.....	130
4.5.2	電路架構與設計.....	131
4.5.3	電路模擬結果.....	132
4.5.4	結果與討論.....	134
4.6	實作，Single Quadrature Down Converter (PHEMT 0.15um).....	135
4.6.1	研究動機.....	135
4.6.2	電路架構與設計.....	135
4.6.3	電路模擬結果.....	138
4.6.4	結果與討論.....	140
4.7	實作，Double Quadrature Down Converter (MHEMT 0.15um).....	141
4.7.1	研究動機.....	141
4.7.2	電路架構與設計.....	141
4.7.3	電路模擬結果.....	143
4.7.4	結果與討論.....	145
第五章	結論.....	147
	參考文獻.....	149
Appendix	實作，沒有 LO 訊號產生器的雙頻帶威福-哈特利鏡像消除降頻器(SiGe 0.35um).....	153

表目錄

表 2.1 雙頻帶威福-哈特利降頻器頻率規畫.....	25
表 2.2 2.4/5.7GHz Dual-Band Weaver-Hartley Image Rejection Down Converter (SiGe 0.35um) Summary.....	47
表 2.3 2.4/5.7GHz Dual-Band Weaver-Hartley Image Rejection Down Converter (CMOS 0.18um) Summary.....	62
表 3.1 Type I、IVMarchand Balun 的 S 參數.....	67
表 3.2 Micromixer with Broad Band Marchand Balun (SiGe 0.35um) Summary.....	78
表 3.3 The Mixer with Marchand Balun and Interdigital Phase Inverter Rat Race (CMOS 0.13um) Summary.....	86
表 3.4 The Micromixer with Type I Marchand Balun (CMOS 0.13um) Summary.....	94
表 3.5 The Micromixer with Type IV Marchand Balun (CMOS 0.13um) Summary.....	102
表 4.1 Compensated Sub-Harmonic Mixer (PHEMT 0.15um) Summary.....	116
表 4.2 Compensated Frequency Doubler (PHEMT 0.15um) Summary.....	125
表 4.3 Simulation :Compensated Sub-Harmonic Mixer (PHEMT 0.15um) Summary.....	130
表 4.4 Simulation :Micromixer(MHEMT 0.15um) Summary.....	135
表 4.5 Simulation : Single Quadrature Down Converter (PHEMT 0.15um) Summary.....	141

表 4.6 Simulation : Double Quadrature Down Converter (MHEMT 0.15um)

Summary.....146



圖目錄

第二章.....	3
圖 2.1 哈特利鏡像消除架構圖.....	5
圖 2.2 威福鏡像消除架構圖.....	6
圖 2.3 威福-哈特利鏡像消除架構圖.....	7
圖 2.4 威福-哈特利鏡像消除架構複數示意圖.....	9
圖 2.5 威福-哈特利鏡像消除降頻器頻譜分析圖，忽略負頻率頻譜的部份(a)在進入電路前需要訊號和鏡像訊號頻譜圖(b)經過第一級降頻器頻譜圖(c)經過第二級降頻器頻譜圖(d)第二鏡像的問題.....	10
圖 2.6 增益、相位不匹配的威福式架構圖.....	13
圖 2.7 雙正交降頻器頻譜分析圖.....	15
圖 2.8 考慮非理想因素的系統分析圖.....	15
圖 2.9 雙頻帶複數訊號頻譜分析圖(a)第一設計訊號頻帶(b)第二設計訊號頻帶.....	18
圖 2.10 第一設計頻帶系統分析圖.....	21
圖 2.11 第二設計頻帶系統分析圖.....	21
圖 2.12 雙頻帶複數訊號頻譜分析圖(a)5.7GHz 頻帶(b)2.4GHz 頻帶.....	23
圖 2.13 雙頻帶威福-哈特利降頻器系統.....	26
圖 2.14 雙頻帶威福-哈特利降頻器電路.....	27
圖 2.15 雙平衡吉伯特混頻器.....	28
圖 2.16 第二級混頻器(a) I-通道(b)Q-通道.....	29
圖 2.17 RC-CR 多相位濾波器 (a)正頻率 (b)負頻率 選擇.....	30

圖 2.18	不同級數RC-CR 多相位濾波器鏡像抑制比率.....	31
圖 2.19	四級 RC-CR 多相位濾波器.....	32
圖 2.20	正交訊號產生器.....	32
圖 2.21	兩級的正交訊號產生器.....	33
圖 2.22	LO1正交訊號產生器及極性切換器.....	34
圖 2.23	輸出緩衝級.....	35
圖 2.24	LO1訊號產生器.....	35
圖 2.25	除2除法器(a)除法器系統圖(b)D型存鎖器(D-latch).....	36
圖 2.26	頻率倍頻器.....	37
圖 2.27	Single Sideband Up Converter.....	38
圖 2.28	轉換增益對 LO 功率(a)射頻頻率:2.4GHz (b)射頻頻率:5.7GHz.....	39
圖 2.29	轉換增益對 IF 頻率(a)射頻中心頻率:2.4GHz (b)射頻中心頻 率:5.7GHz.....	40
圖 2.30	鏡像消除比值對IF頻率 (a)射頻中心頻率:2.4GHz (b)射頻中心頻 率:5.7GHz.....	41
圖 2.31	2.4/5.7 GHz RF埠到IF埠隔離度.....	42
圖 2.32	LO埠到RF埠與LO埠到IF埠隔離度.....	42
圖 2.33	RF埠輸入返回損耗.....	43
圖 2.34	雜訊指數.....	43
圖 2.35	IP1dB與IIP3量測結果.....	44
圖 2.36	I、Q通道輸出波形.....	44
圖 2.37	Die Photo.....	45
圖 2.38	雙頻帶威福-哈特利降頻器系統.....	49
圖 2.39	雙頻帶威福-哈特利降頻器電路.....	50
圖 2.40	第一級混頻器:微混頻器.....	50
圖 2.41	第二級混頻器:吉伯特混頻器.....	51

圖 2.42	LO2訊號產生器.....	52
圖 2.43	除5除法器(a)除法器系統圖(b)D型存鎖器(D-latch).....	52
圖 2.44	頻率倍頻器.....	53
圖 2.45	轉換增益對LO功率 (a)射頻頻率:2.4GHz (b)射頻頻率:5.7GHz.....	54
圖 2.46	轉換增益對IF頻率(a)射頻中心頻率:2.4GHz (b)射頻中心頻率:5.7GHz.....	55
圖 2.47	鏡像消除比值對IF頻率 (a)射頻中心頻率:2.4GHz (b)射頻中心頻率:5.7GHz.....	56
圖 2.48	2.4/5.7 GHz RF埠到IF埠隔離度.....	57
圖 2.49	LO埠到RF埠與LO埠到IF埠隔離度.....	57
圖 2.50	RF埠輸入返回損耗.....	58
圖 2.51	雜訊指數.....	58
圖 2.52	IP1dB與IIP3量測結果.....	59
圖 2.53	I、Q通道輸出波形.....	59
圖 2.54	Die Photo.....	60
第三章.....		63
圖 3.1	Type I~IV Marchand Balun.....	65
圖 3.2	Type I Marchand Balun 的 S_{11} 推導.....	66
圖 3.3	利用寬頻 Marchand Balun 微混頻器.....	68
圖 3.4	寬頻 Marchand Balun.....	69
圖 3.5	寬頻 Marchand Balun 的佈局圖.....	70
圖 3.6	吉伯特混頻器.....	71
圖 3.7	微混頻器架構.....	72
圖 3.8	轉換增益對LO功率.....	73
圖 3.9	轉換增益、IP1dB、IIP3 對 RF 頻率.....	73
圖 3.10	轉換增益對 IF 頻率.....	74

圖 3.11	中心頻率 IP1dB 與 IIP3 量測結果.....	74
圖 3.12	隔離度.....	75
圖 3.13	輸入返回損耗.....	75
圖 3.14	雜訊指數.....	76
圖 3.15	雜訊指數在 IF 頻率固定下掃 RF 頻率的結果.....	76
圖 3.16	Die Photo.....	77
圖 3.17	利用 Marchand Balun 與 Rat Race 的混頻器.....	79
圖 3.18	轉換增益對 LO 功率.....	81
圖 3.19	轉換增益、IP1dB、IIP3 對 RF 頻率.....	81
圖 3.20	轉換增益對 IF 頻率.....	82
圖 3.21	IP1dB 與 IIP3 量測結果.....	82
圖 3.22	隔離度.....	83
圖 3.23	RF 埠輸入返回損耗.....	83
圖 3.24	雜訊指數.....	84
圖 3.25	雜訊指數在 IF 頻率固定下掃 RF 頻率的結果.....	84
圖 3.26	Die Photo.....	85
圖 3.27	利用 Type I Marchand Balun 微混頻器.....	87
圖 3.28	轉換增益對 LO 功率.....	88
圖 3.29	轉換增益、IP1dB、IIP2、IIP3 對 RF 頻率.....	89
圖 3.30	轉換增益對 IF 頻率.....	89
圖 3.31	RF 為中心頻率時 IP1dB 與 IIP3 量測結果.....	90
圖 3.32	隔離度.....	90
圖 3.33	RF 埠輸入返回損耗.....	91
圖 3.34	雜訊指數.....	91
圖 3.35	雜訊指數在 IF 頻率固定下掃 RF 頻率的結果.....	92
圖 3.36	Die Photo.....	92

圖 3.37	利用 Type IV Marchand Balun 微混頻器.....	95
圖 3.38	轉換增益對 LO 功率.....	96
圖 3.39	轉換增益、IP1dB、IIP2、IIP3 對 RF 頻率.....	96
圖 3.40	轉換增益對 IF 頻率.....	97
圖 3.41	RF 為中心頻率時 IP1dB 與 IIP3 量測結果.....	97
圖 3.42	隔離度.....	98
圖 3.43	RF 埠輸入返回損耗.....	98
圖 3.44	雜訊指數.....	99
圖 3.45	雜訊指數在 IF 頻率固定下掃 RF 頻率的結果.....	99
圖 3.46	轉換增益對 RF 頻率(主動電路一樣，Marchand Balun 分別使用 Type I 與 Type IV).....	100
圖 3.47	Die Photo.....	100
第四章	103
圖 4.1	補償式次諧波混頻器.....	105
圖 4.2	LO 埠訊號漏到 RF 埠.....	106
圖 4.3	傳統乘法器(a)電路圖(b)模型.....	108
圖 4.4	改良式乘法器模型.....	108
圖 4.5	轉換增益對 LO 功率.....	110
圖 4.6	轉換增益對 RF 功率.....	110
圖 4.7	IP1dB 量測結果.....	111
圖 4.8	轉換增益對 RF 頻率.....	111
圖 4.9	轉換增益對 IF 頻率.....	112
圖 4.10	RF 埠到 IF 埠隔離度.....	112
圖 4.11	LO、2LO 頻率從 LO 埠到 IF 埠隔離度.....	113
圖 4.12	LO、2LO 頻率從 LO 埠到 RF 埠隔離度.....	113
圖 4.13	RF 埠輸入返回損耗.....	114

圖 4.14	Die Photo.....	114
圖 4.15	補償式頻率倍頻器.....	117
圖 4.16	coupled line coupler.....	118
圖 4.17	coupled line coupler 實際繞線.....	119
圖 4.18	電流合成器.....	120
圖 4.19	電流合成器工作原理.....	121
圖 4.20	轉換增益對輸入功率.....	121
圖 4.21	轉換增益對輸入頻率.....	122
圖 4.22	隔離度.....	122
圖 4.23	輸入返回損耗.....	123
圖 4.24	輸出返回損耗.....	123
圖 4.25	Die Photo.....	124
圖 4.26	補償式次諧波混頻器.....	126
圖 4.27	轉換增益對 LO 功率.....	127
圖 4.28	轉換增益對 RF 功率.....	127
圖 4.29	轉換增益對 RF 頻率.....	128
圖 4.30	RF 埠輸入返回損耗.....	128
圖 4.31	Layout.....	129
圖 4.32	微混頻器(Micromixer).....	131
圖 4.33	轉換增益對 LO 功率.....	132
圖 4.34	轉換增益對 RF 功率.....	132
圖 4.35	轉換增益對 RF 頻率.....	133
圖 4.36	RF 埠輸入返回損耗.....	133
圖 4.37	Layout.....	134
圖 4.38	單正交四相位降頻器系統分析圖.....	136
圖 4.39	頻譜分析圖.....	137

圖 4.40	單正交四相位降頻器.....	137
圖 4.41	轉換增益對 LO 功率.....	138
圖 4.42	轉換增益對 RF 功率.....	138
圖 4.43	輸入需要訊號頻率(RF=25.03GHz)所得到的 IF 頻譜.....	139
圖 4.44	輸入鏡像訊號頻率(RF=24.97GHz)所得到的 IF 頻譜.....	139
圖 4.45	Layout.....	140
圖 4.46	雙正交四相位降頻器系統分析圖.....	141
圖 4.47	雙正交四相位降頻器.....	142
圖 4.48	轉換增益對 LO 功率.....	143
圖 4.49	轉換增益對 RF 功率.....	143
圖 4.50	輸入需要訊號頻率(RF=17.03GHz)所得到的 IF 頻譜.....	144
圖 4.51	輸入鏡像訊號頻率(RF=16.97GHz)所得到的 IF 頻譜.....	144
圖 4.52	Layout.....	145

