

Radar Αυτοκινήτων στα 77 GHz.

Γιαννόπουλος Νικόλαος 9629 , Μπουλίοπουλος Στάυρος Βασίλειος 9671

ngiannop@ece.auth.gr smpoulio@ece.auth.gr

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Abstract—Στην παρούσα εργασία θα παρουσιάσουμε την ανάγκη υπάρξεις τον **radar** αυτοκινήτων τον **77GHz** καθώς θα δείξουμε την ιστορική αναδρομή του, την πρώτη εφαρμογή τους. Επιπλέον πως κυριάρχησε η τεχνολογία **CMOS** στα **Radar**, στην συνέχεια θα δείξουμε ένα **Voltage Control Oscillator** Πολυστρωματικός ομοεπίπεδος κυματοδηγός με βάση συντονισμένο επαγωγέα **CMOS (MultilayerCoPlanarWaveguide-Based Tunable Inductor CMOS)** ,έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου(**LNA 77GHz**) σε τεχνολογία **CMOS 90nm** και τέλος ένα ενσωματωμένο σύστημα πομποδέκτη στα **77GHz**.

Keywords: CMOS, LNA, PA, 77 GHz, RADAR, MCPW

I. Τι είναι το RADAR/Γιατί το χρειαζόμαστε/Οι εφαρμογές του

Το διεθνές όνομα ραντάρ προέρχεται από σύντμηση των αγγλικών λέξεων «radio detection and ranging» και σημαίνει «Ανίχνευση με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και μέτρηση αποστάσεως». Αποτελεί βασικό ηλεκτρονικό σύστημα ηλεκτρομαγνητικού εντοπισμού, παρακολούθησης ακίνητων και κινητών στόχων, σε αποστάσεις και συνθήκες φωτισμού απαγορευτικές για τον απευθείας οπτικό εντοπισμό, δηλαδή με το ανθρώπινο μάτι ή και οπτικά όργανα. Η μεγάλη αξία του ραντάρ οφείλεται στις σημαντικές δυνατότητες ανίχνευσης και παρακολούθησης στόχων σε μεγάλες αποστάσεις και με μεγάλη ακρίβεια όπως ανίχνευση επιφάνειας που τοποθετούνται σε πλοία και στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα ραντάρ ανιχνεύσεως επιφάνειας ή αλλιώς ραντάρ ναυσιπλοΐας, εγκαθίστανται σε ακτές ή σε πλοία και ανιχνεύουν την επιφάνεια της θάλασσας. Ανιχνεύουν όμως και τον εναέριο χώρο, αλλά σε μικρό ύψος. Εντοπίζουν στερεά αντικείμενα από σχετικά αγωγίμο υλικό (στόχους), που βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας ή σε μικρό ύψος και παρέχουν ακριβείς πληροφορίες αποστάσεων και διοπτύσεων των στόχων που εντοπίζουν. Ο εντοπισμός των στόχων επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από τις συνθήκες ορατότητας και σε αποστάσεις μεγαλύτερες από αυτές του ορατού ορίζοντα. Χρησιμοποιούνται για να διασφαλίζουν την ασφαλή ναυσιπλοΐα, τον εντοπισμό εχθρικών ή μη πλοίων και την ύπαρξη ή μη αντικειμένων (στόχων) στην επιφάνεια της θάλασσας. Μετεωρολογικά ραντάρ με αυτά εξασφαλίζεται ο έγκαιρος εντοπισμός και η παρακολούθηση των επερχομένων καταιγίδων και κυκλώνων.

II. Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη

Η γενική ιδέα των ραντάρ και της αντανάκλασης κυμάτων από στερεά αντικείμενα προτάθηκε το 1886 από τον γνωστό έως σήμερα γερμανό Φυσικό Heinrich Hertz και βρήκε εφαρμογή σε διάφορους τομείς. Η εστίαση της

έρευνας στον τομέα των αισθητήριων ραντάρ αυτοκινήτου έχει μετατοπιστεί από θέματα καθαρά προσανατολισμένα στο υλικό και σε επίπεδο συσκευής(προειδοποίηση ατυχημάτων, AdaptiveCruiseControl(ACC), AutomaticEmergency Brake(AEB), BlindSpotDetection(BSD), LaneChangeAssist(LCA) σε εξελιγμένα συστήματα χιλιοστών κυμάτων και θέματα επεξεργασίας σήματος ραδιοσυχνοτήτων ,όπως ψηφιακά σχήματα διαμορφώσεως, δίκτυα ραντάρ και απεικόνιση ραντάρ , για την ασφάλεια των οδηγών και των πεζών. Στην χρονική διάρκεια 1960-1975 οι προθέσεις εφαρμογής των ραντάρ ήταν η ανίχνευση εμποδίων προ σύγκρουσης και η έκτακτη ανάγκη φρεναρίσματος βάσει των τότε διαθέσιμων τεχνολογιών(στοιχεία GUNN για μετάδοση και Schottky διόδους για δέκτη). Στα επόμενα έτη η εξέλιξη των τρανζίστορ και η υψηλή συχνότητα αποκοπής αυτών οδήγησε στην λειτουργία των ραντάρ σε υψηλότερες συχνότητες. Εισήχθησαν οι τεχνολογίες επίπεδων OK και μαζί τους οι ενσωματωμένες κεραίες για τις συχνότητες των 10GHz(X-band) και 15GHz(Ku-band) με την βοήθεια των κυματοδηγών. Η κύρια αρχή του ραντάρ πρώτα βασίστηκε στην μετάδοση δύο συχνοτήτων με αξιολόγηση φάσης για μέτρηση απόστασης ακολουθούμενη από συνεχές κύμα διαμορφωμένο με παλμό και συχνότητα (FMCW).Οι συχνότητες αρχικά ήταν 10GHz ή 15GHz με αποτέλεσμα να είναι μεγάλες οι περιοχές κεραίας για τα απαιτούμενα πλάτη δέσμης. Μετά από αυτό,24GHz(ISM-band),35GHz όπου είχαμε σχετικά χαμηλή ατμοσφαιρική εξασθένιση σήματος και τελικά οδηγηθήκαμε στα 77GHz για την μείωση του μεγέθους διαφράγματος της κεραίας.

III. Η πρώτη εφαρμογή των RADAR 77 GHz

Η εταιρία Mercedes Benz το 1999 εμφάνισε στην αγορά το σύστημα ραντάρ αυτοκινήτων στα 77GHz στα εργαστήρια της Macom,USA μια τεχνολογία βασισμένη σε έναν GUNN ταλαντωτή και σε κύκλωμα δέκτη με microstrip.Η κεραία ήταν διπλωμένη παραβολικά ανακλώμενη με τρεις διακόπτες δέσμες(τρεις τροφοδοσίες που επιλέγονται από διακόπτη SP3T).Φαίνεται στα αριστερά το μπροστινό μέρος και στα δεξιά το πίσω μέρος του ραντάρ στην αυτοκινητοβιομηχανία με την εμπορική ονομασία ARS 100 Εικόνα 1. Αργότερα, η εταιρία Continental στην Γερμανία ανέπτυξε την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία με την συμπερίληψη Μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα μικροκυμάτων από αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs MMICs) και η κεραία αντικαταστήθηκε από τροποποιημένη διπλωμένη κεραία ανακλαστικής διάταξης βα-

σιζόμενη στο προηγμένο σύστημα σάρωσης όπως φαίνεται Εικόνα 2.

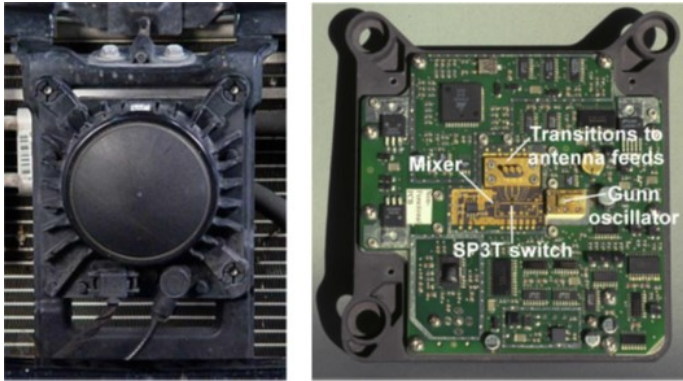


Figure 1: ARS 100

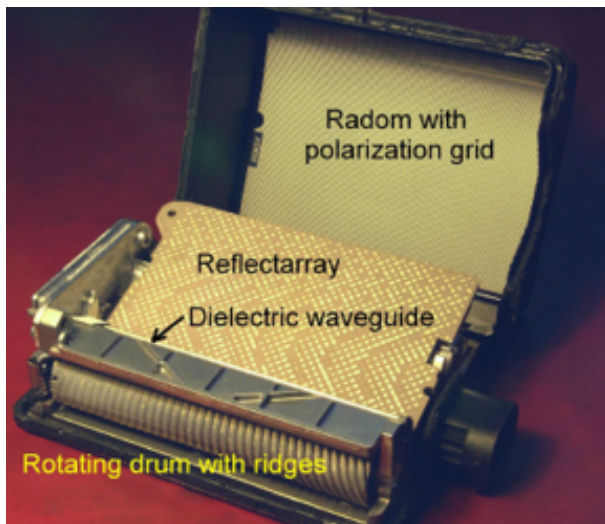


Figure 2: Antenna

IV. Η εγκαθίδρυση της τεχνολογίας CMOS

Από το 2010 τα τρανζίστορ με πυρίτιο γεργμάνιο (SiGe) ξεκίνησαν να έχουν ανταγωνιστικό χαρακτήρα ως προς το κόστος και την ταχύτητά τους έναντι της τεχνολογίας αρσενιδίου του γαλλίου (GaAs). Όστερα από ερευνες και συγκρίσεις των διαφόρων τεχνολογιών τρανζίστορ επικράτησε αυτή των CMOS στην Εικόνα 3. Καταφέρνουμε χάρη στα CMOS εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα ολοκλήρωσης για ψηφιακά κυκλώματα και καλή απόδοση RF. Εδώ στην Εικόνα 4 βλέπουμε ένα τυπικό εμπορικό SoC από την Bosch τεχνολογίας 77 GHz CMOS FDSOI 22nm με 2 πομπούς, 2 δέκτες ολόκληρη την αναλογική ζώνη βάσης, ADC και DSP accelerator (π.χ. FFT) και αλγόριθμο που κάνει ανίχνευση πιθανού στόχου θορύβου ή παρεμβολής προκειμένου να τον απορρίπτει (CFAR).

V. VCO MCPW-BASED TUNABLE INDUCTOR CMOS

Το παχύ επάνω μεταλλικό στρώμα στην Εικόνα 5 χρησιμοποιείται για τις γραμμές σήματος για να διατηρηθεί η

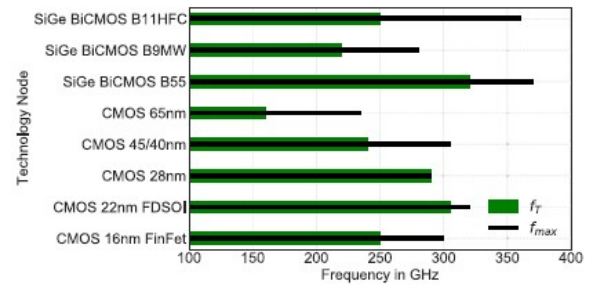


Figure 3: Σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών

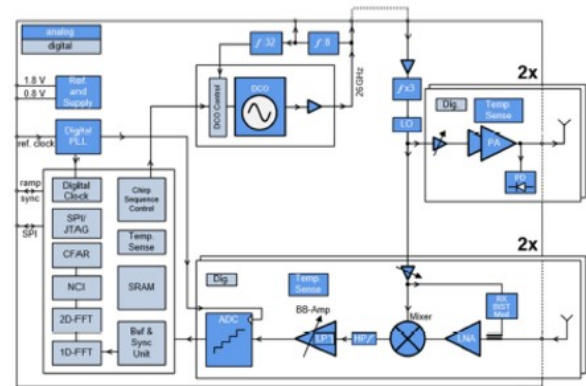


Figure 4: Τυπικό κύκλωμα SoC από την Bosch

εξασθένιση λόγω μικρών απωλειών αγωγιμότητας. Όλα τα μεταλλικά στρώματα είναι συνδεδεμένα στο κάτω επίπεδο γείωσης μέσω αγωγών για να σχηματιστεί το μεταλλικό πλευρικό τοίχωμα ως το επίπεδο γείωσης του ομοεπίπεδου κυματοδηγού.

Τα δύο επίπεδα γείωσης έχουν το ίδιο δυναμικό, το οποίο καταστέλλει τον τρόπο διάδοσης των παρασιτικών φαινομένων. Το πολυστρωματικό επίπεδο γείωσης μειώνει σημαντικά την σύζευξη ηλεκτρικού πεδίου σε διπλανά κυκλώματα. Μοντελοποιούμε μικρο-ηλεκτρονικά τον MCPW με την βοήθεια του π-ισοδύναμου όπως φαίνεται στην Εικόνα 6 προκειμένου να υπολογίσουμε την επαγωγή και τον συντελεστή ποιότητας που φαίνεται στην Εικόνα 7.

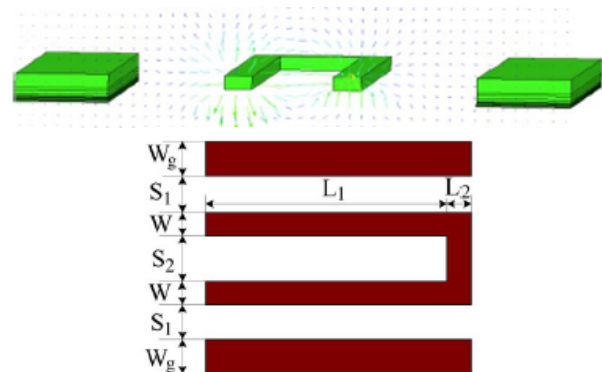


Figure 5: Προσομοίωση Πηνίου

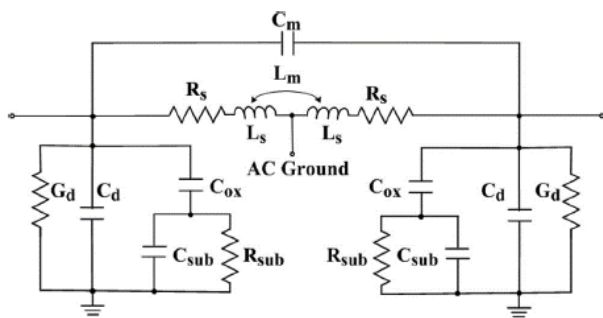


Figure 6: π-ισοδύναμο

Frequency (GHz)	Inductance (pH)		Quality factor	
	Model	Simulation	Model	Simulation
60	80.99	86.01	24.89	29.77
65	80.88	86.39	25.87	30.50
70	80.77	86.83	26.81	31.15
75	80.68	87.33	27.72	31.70
80	80.59	87.88	28.60	32.18
85	80.51	88.49	29.45	32.57
90	80.45	89.15	30.28	32.90

Figure 7: Αποτελέσματα προσομοιώσεις

Ο επαγωγέας που βασίζεται σε MCPW εφαρμόζεται σε VCO ρυθμιζόμενο στα 77GHz. Το κύκλωμα που φαίνεται στην Εικόνα 8 VCO αποτελείται από :

- Διαφορικό πηνίο L1
- Ζεύγος varactor
- NMOS διασταυρωμένο ζεύγος M1-M2

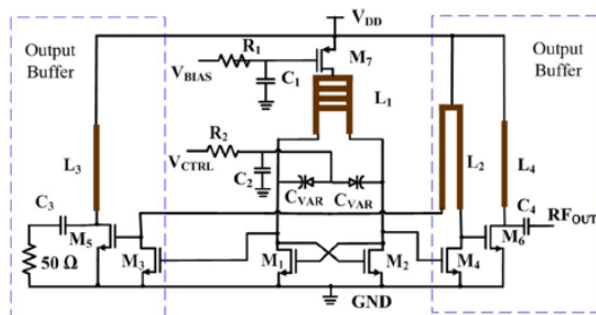


Figure 8: Κύκλωμα VCO

Το οποίο δημιουργεί αρνητική αντίσταση για να ακυρώσει τις παρασιτικές απώλειες του LC tank. Επιπλέον αποτελείται από διβάθμιο buffer εξόδου, ο οποίος απαιτείται από την στιγμή που θέλουμε επαρκή ισχύ εξόδου και οι πυκνωτές μεγάλου φορτίου επηρεάζουν σημαντικά τη συχνότητα λειτουργίας του VCO, ο διαφορικός επαγωγέας L2 που βασίζεται σε MCPW χρησιμοποιείται αντί για δύο συμβατικούς συμμετρικούς επαγωγείς μονού άκρου, ο οποίος έχει το πλεονέκτημα της μικρότερης επιφάνειας κατοχής και της μεγαλύτερης ανοσίας στον περιβαλλοντικό θόρυβο λόγω

της απόρριψης κοινής λειτουργίας (CMR). Ο συντελεστής ποιότητας του L2 είναι υψηλότερος από έναν επαγωγέα μονού άκρου λόγω των μειωμένων αλληλεπιδράσεων μεταξύ του διαφορικού επαγωγέα και του υποστρώματος. Η διάταξη της διασύνδεσης μεταξύ του πυρήνα VCO και του buffer εξόδου βελτιστοποιείται και η παρασιτική χωρητικότητα μειώνεται. Δεδομένου ότι το VCO έχει σχεδιαστεί για 77GHz FMCW πομποδέκτη ραντάρ, χρησιμοποιούνται δύο buffer εξόδου για την οδήγηση του downConversion μείκτη και του ενισχυτή ισχύος.

Το τρανζίστορ pMOS M7 χρησιμοποιείται ως πηγή ρεύματος επειδή ο $1/f$ θόρυβος των τρανζίστορ pMOS είναι μικρότερος από αυτόν των nMOS. Για τη μείωση του θορύβου φάσης του VCO χρησιμοποιούμε RC χαμηλοπερατά φίλτρα (R1-C1, R2-C2). Στις συχνότητες πάνω από τη γωνιακή συχνότητα του φίλτρου απορρίπτεται ο flicker και ο θερμικός θόρυβος. Το προτεινόμενο μοντέλο και ο συντονιζόμενος επαγωγέας με δομή κλίμακας είναι χρήσιμα για την απόκτηση της πρώτης επιτυχίας πυριτίου και αποφυγή περιττών ταινιών λόγω της ανακρίβειας του μοντέλου και την διακύμανσης της διαδικασίας σχεδίασης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 9 καθώς η είσοδος Vctrl κυμαίνεται από 0 V έως 3.0 V και χρησιμοποιώντας από καμία έως 3 Shorting Ladder είναι εμφανής η διαφορά στην συχνότητα που μας δίνει ο VCO. Ενδεικτικά φαίνεται στην Εικόνα 10 το chip σε ολοκληρωμένη μορφή.

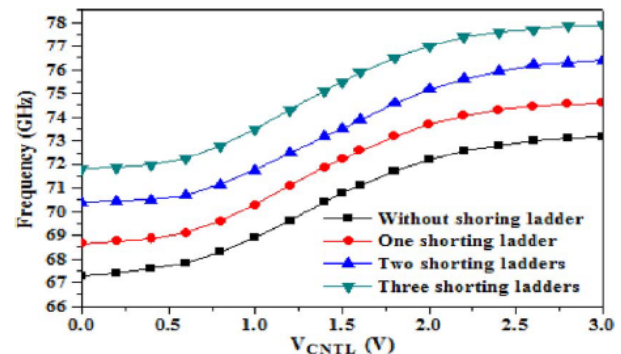


Figure 9: VCO frequency based on Vctrl/shorting ladder

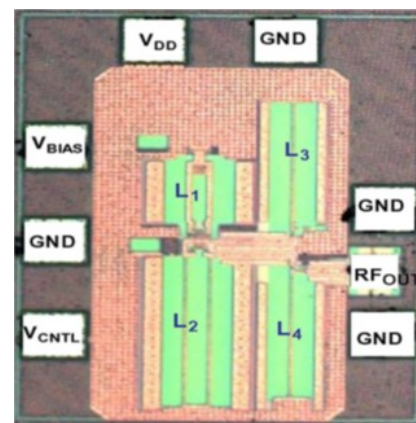


Figure 10: Chip σε ολοκληρωμένη μορφή

VI. LNA 77GHz σε τεχνολογία 90nm CMOS

Τώρα αναλύουμε έναν LNA χαμηλής κατανάλωσης με ευρείας ζώνης όπως φαίνεται στην Εικόνα 11 και η ολοκληρωμένη του μορφή καθώς περιέχει δύο στάδια mm-wave LNA στα 10mW. Πετυχαίνουμε με την τεχνική T-matching ταυτόχρονα καλή αντίσταση εισόδου και εξόδου ευρείας ζώνης, ευρυζωνικό κέρδος ισχύος (S_{21}), παράμετρος $S_{11} < -10$ dB, NF 4.8 dB

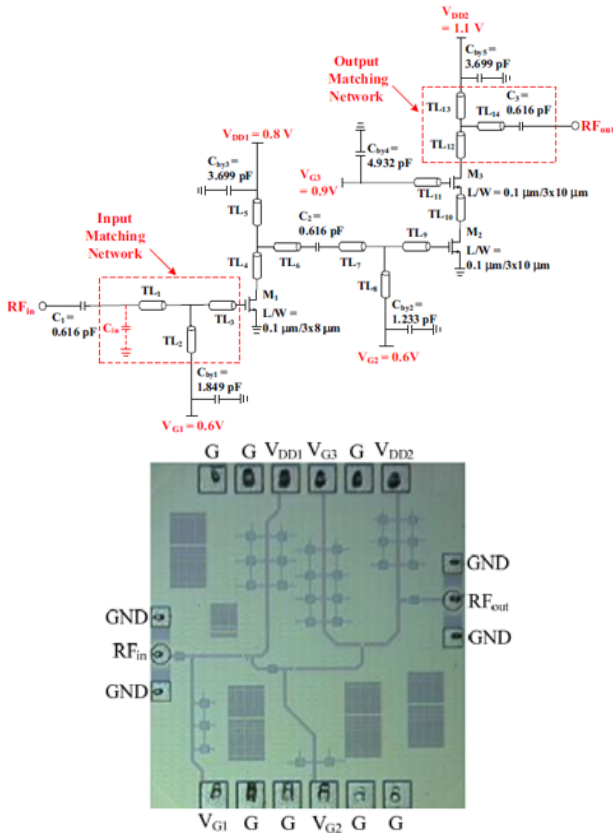


Figure 11: Κύκλωμα LNA

και σημείο τομής τρίτης ταξής (IIP3) 7.5dBm. Οι επαγωγείς της γραμμής μεταφοράς (TL) τοποθετούνται με το άνω άκρο του μετάλλου πάχους 3,4 μm (M9) για να ελαχιστοποιήσουμε την απώλεια αντίστασης. Αποτελεί ένα στάδιο εισόδου κοινής πηγής που ακολουθείται από ένα στάδιο κασκοδικής εξόδου. Η C_{in} είναι παρασιτική χωρητικότητα του πυκνωτή σύζευξης εισόδου C_1 . Για να μεγιστοποιηθεί το εύρος ζώνης των 3 dB του S_{21} , η έξοδος κάθε σταδίου φορτώθηκε ισοδύναμα με ένα κύκλωμα RLC παράλληλου συντονισμού με χαμηλό Q. Επιλέγουμε κατάλληλα τις TL και το M1(W/L, Cgs, gm) για να πετύχουμε συχνότητες γύρω από τα 77GHz. Τέλος, ο LNA εμφανίζει υψηλό και επίπεδο S_{21} όπως φαίνεται στην Εικόνα 12, μικρής κλίμακας καθυστέρηση διακύμανσης και εξαιρετικό NF καθώς φαίνονται οι διαφορές από τις άλλες τεχνολογίες στην Εικόνα 13.

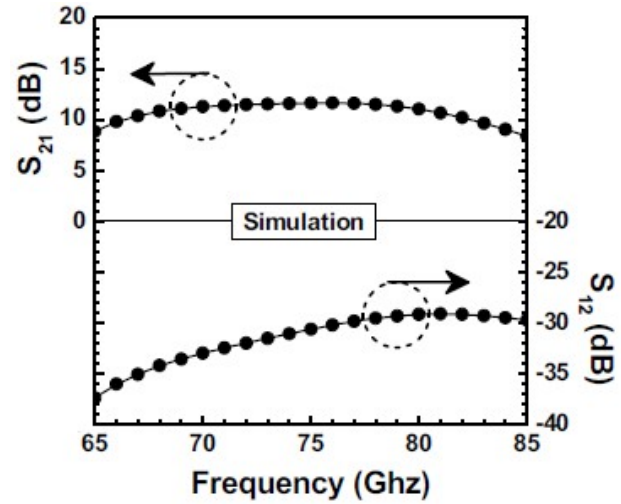


Figure 12: $S_{21}=11,2\pm 1,5$ dB και $S_{12}<-29$ dB για 64,8-84,6GHz

	Frequency (GHz)	3-dB BW (GHz)	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	NF (dB)	GD Variation	PI (dB)	IIP3 (dBm)	P_{dc} (mW)	FOM (GHz/mW)	Technology (f_t/f_{max} in GHz)
This Work	58-77	22.5	<-10	11.2±1.5	4.8	±4	-18.7	-7.4	10	4.04	90 nm CMOS (151/148)
[1] 2010 MWCL	77-81	14.5	<-11	13.8±0.7	6.9	NA	-11.4	NA	37	0.49	0.18 μm SiGe BiCMOS (200/200)
[2] 2011 NEWCAS	77-81	6.5	<-10	8.5±1.5	7.2 (Simulation)	NA	-18	NA	9	0.45	0.13 μm SiGe BiCMOS (230/280)
[3] 2012 IEEE RFT	76-77	7	-10	11	7.8	NA	-40	NA	25.8	0.19	65 nm CMOS (NA/NA)
[4] 2012 MWCL	66-78	12	<-5	21.3	7.6	NA	-18 (Simulation)	NA	40	0.73	0.25 μm SiGe-C BiCMOS (190/220)

Figure 13: Πίνακας Σύγκρισης

VII. 77 GHz RADAR με ενσωματωμένο πομποδέκτη

Ένα πλήρες ενσωματωμένο σύστημα ραντάρ αυτοκινήτου FMCW 77GHz φαίνεται κυκλωματικά στην Εικόνα 14 και μακροσκοπικά στην Εικόνα 15. Αξιοποιεί έναν fractional-synthesizer ως γεννήτρια FMCW, το carrier γραμμικής διαμόρφωσης του πομπού είναι στα 700MHz. Ο δέκτης μαζί με έναν εξωτερικό baseband επεξεργαστή ανιχνεύει την απόσταση και τη σχετική ταχύτητα με FFT αλγόριθμο. PA και LNA mm-wave είναι ενσωματωμένο σε σιπ με 65nm CMOS. Ο πομποδέκτης περιέχει:

- front-end RF (PA, LNA, mixer)
- 2 κεραίες υψηλής απολαβής
- γεννήτρια FMCW (fractional synthesizer)
- FPGA επεξεργαστή σήματος
- VCO δίνει carrier σήμα 77GHz στον PA, μίκτη, πρώτο διαιρέτη.

Δεν χρειαζόμαστε πολλά blocks mm κυμάτων όπως πολυπλασιαστές συχνότητας. Το ρολόι αναφοράς έχει ρυθμιστεί στα 700MHz από εξωτερικό PLL με κρυσταλλικό ταλαντωτή. Ένας διαμορφωτής 16-bit παράγει 3-bit σήμα διαμόρφωσης για τον 24-31 διαιρέτη, ο οποίος ακολουθεί τον 2ο διαιρέτη. Το ρολόι πλήρους βαθμού ρυθμού ενισχύεται από τον PA και συνδέεται με την κεραία. Συνεπώς το ανακλώμενο σήμα ψηφιοποιείται και στέλνεται στον DSP. Ένας αλγόριθμος FFT εφαρμόζεται στον DSP για τον υπολογισμό της απόστασης και της ταχύτητας, ο οποίος μπορεί να παρακολουθεί έως και 5 αντικείμενα ταυτόχρονα. Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη ανάλυση συχνότητας, ο χρόνος δειγματοληψίας FFT θα πρέπει να είναι

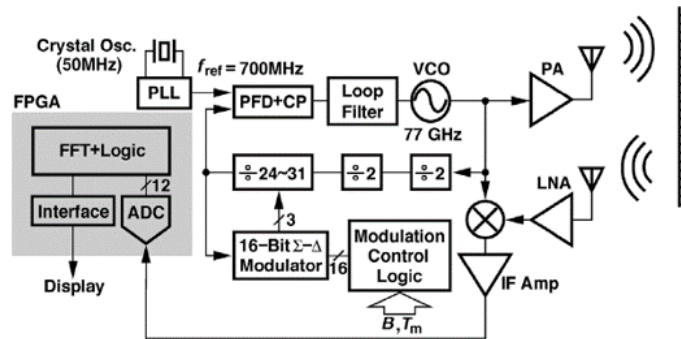


Figure 14: Αρχιτεκτονική ενσωματωμένου συστήματος ραντάρ αυτοκινήτου FMCW 77GHz

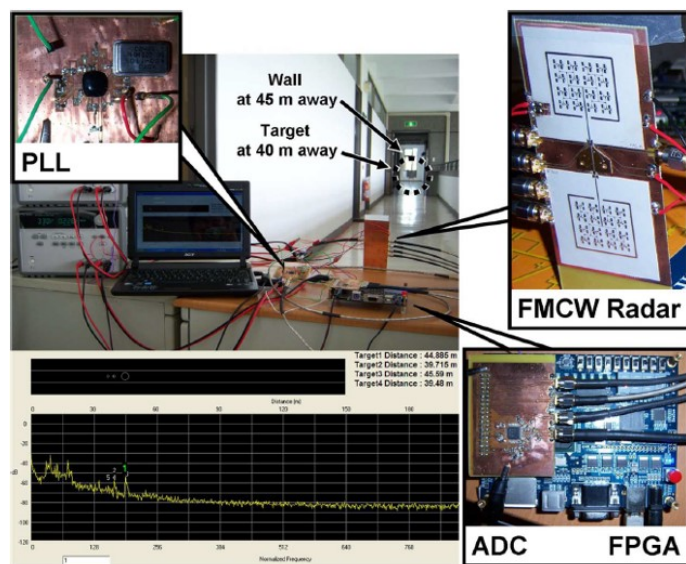


Figure 15: Ενσωματωμένο σύστημα ραντάρ αυτοκινήτου

τόσο μεγάλος ώστε να αξιοποιεί πλήρως τις πληροφορίες για την εκτίμηση συχνότητας IF σε κάθε διάστημα και μεσοδιάστημα. Έτσι, επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός του DSP και των modulation logics.

Ο VCO έχει δομή LC-tank με varactors πάχους οξειδίου 5.6nm για την καταστολή του leakage όπου φαίνεται στην Εικόνα 16. Χρησιμοποιούμε ένα ψευδοδιαφορικό συντονισμένο ζεύγος ενισχυτών M3-M4 ως buffer για να οδηγήσουμε ένα μεγάλο φορτίο 66 fF για τον διαχωριστή, το PA και τον μείκτη στα 77 GHz.

Ο πρώτος διαιρέτης όπου φαίνεται στην Εικόνα 17 υλοποιείται με direct injection-locked τοπολογία, όπου το σήμα ελέγχου συνδέεται με την πύλη του διακόπτη M7. Η τάση πόλωσης V_b επηρεάζει το εύρος κλειδώματος. Το υψηλότερο V_b παράγει μεγαλύτερο εύρος κλειδώματος υποβαθμίζοντας το tank και μειώνοντας την ταλάντευση εξόδου. Με ταλάντευση εισόδου 800mV, ο διαιρέτης αποτυγχάνει για $V_b > 1V$. Εδώ, επιλέγουμε $V_b = 0.8V$ για να φτάσουμε σε εύρος κλειδώματος 4 GHz με επαρκές περιθώριο σχεδιασμού. Αυτοί του τύπου οι διαιρέτες παρουσιάζουν λιγότερο kickback από ότι τους αντίστοιχους στατικούς και στην Εικόνα 18

φαίνεται η γραφική του παράσταση

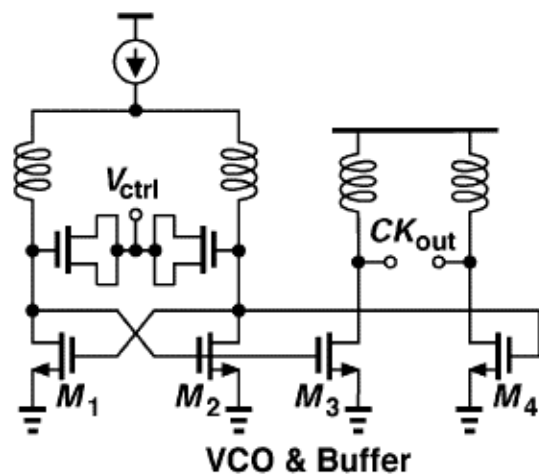


Figure 16: VCO + Buffer

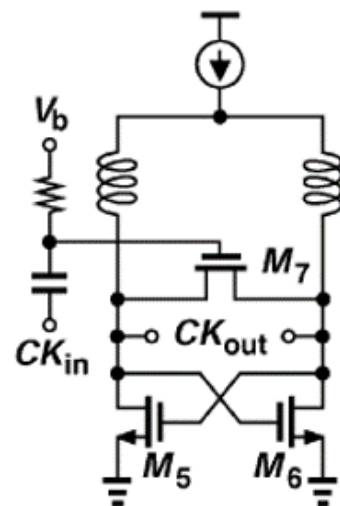


Figure 17: Πρώτος Διαιρέτης

Ο δεύτερος διαιρέτης υλοποιείται με στατική τοπολογία και CML δομή όπως στην Εικόνα 19. Απαιτείται ένας διαφορικός μετατροπέας με CML-σε-CMOS μεταξύ του 2ου και του 3ου κελιού όπου τα κελιά φαίνονται στην Εικόνα 20. Και οι δύο ψευδοδιαφορικές ίσοδοι και στο 3ο κελί χρησιμοποιούνται για την οδήγηση 2 latches για το καθένα. Στην τεχνολογία CMOS 65 nm, ο μετατροπέας παρουσιάζει -3dB εύρος ζώνης 10,5 GHz ενώ καταναλώνει ισχύ 2,2 mW.

Ο Low Noise Amplifier όπως φαίνεται στο πάνω μέρος της Εικόνας 21 χρησιμοποιεί 3 ίδια στάδια κέρδους που το καθένα έχει κασκοδική δομή και συζευγμένα δίκτυα αντιστοίχισης τοποθετούνται μεταξύ των σταδίων. Τοποθετούμε δύο στρώσεις μετάλλου ως επίπεδο γείωσης για την αποφυγή σημαντικής διαρροής στο υπόστρωμα. Τα M1 και M2 διοχετεύονται μέσω διόδων για να σχηματίσουν ένα

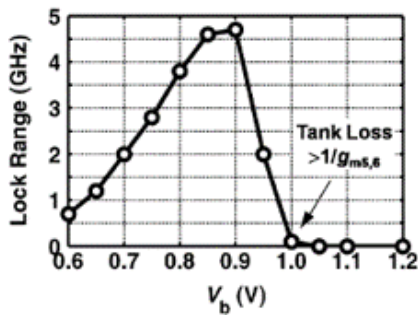


Figure 18: Γραφική Παράσταση

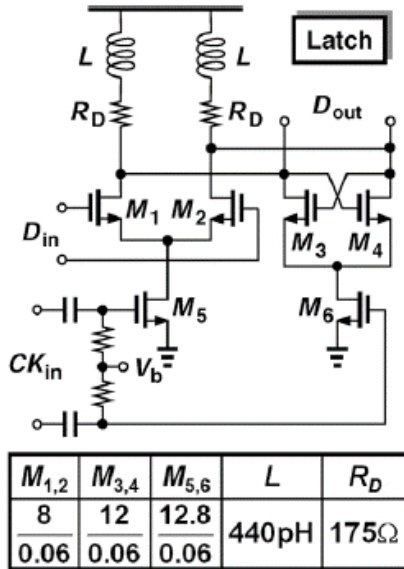


Figure 19: Δευτερός Διαιρέτης

παχύτερο επίπεδο γείωσης χωρίς σχισμή διείσδυσης. Το κέρδος LNA και ο αριθμός θορύβου βελτιώνονται κατά τουλάχιστον 2 έως 4 dB χρησιμοποιώντας αυτήν τη γείωση διπλής στρώσης. Τα M1-M2 είναι σε κοινό junction για να ελαχιστοποιηθεί η παρασιτική χωρητικότητα του εσωτερικού κόμβου. Το ποσοστό θορύβου του δέκτη καθορίζεται κυρίως από τον μείκτη και τον ενισχυτή IF. Επιθυμούμε ο LNA να διατηρείται σε περιοχή υψηλού κέρδους.

Ο Power Amplifier όπως φαίνεται στο κάτω μέρος της Εικόνας 21 χρησιμοποιεί 5 στάδια σε καταρράκτη με συζυγή αντιστοίχιση ενδιάμεσα που το καθένα αποτελείται από ενισχυτή A-class μιας βαθμίδας. Προσθέτουμε τοπικά bypass C1 για την βελτίωση της σταθερότητας στην παροχή και R1-C2 για τη μείωση της σύνθετης αντίστασης και του παράγοντα ποιότητας σε χαμηλές συχνότητες.

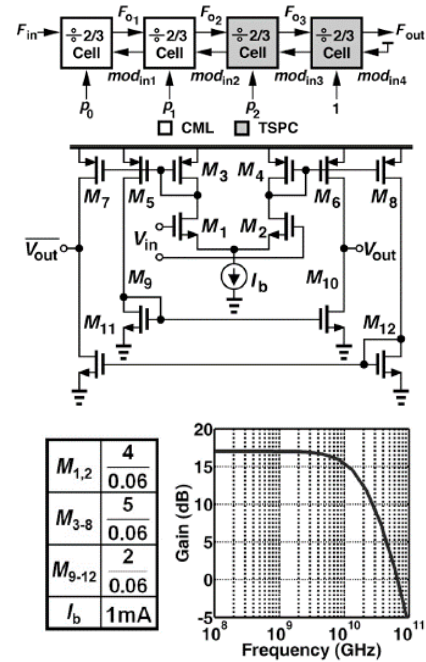


Figure 20: Cells

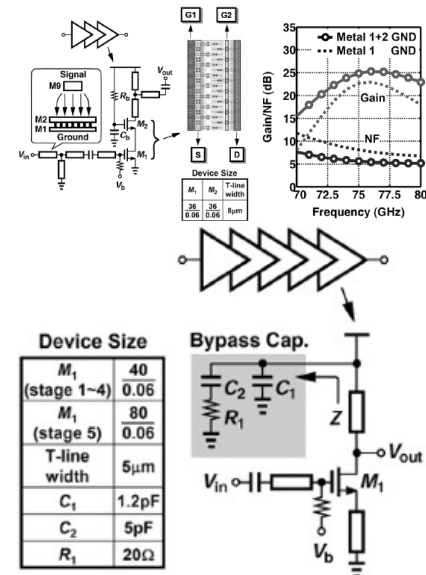


Figure 21: LNA και PA αρχιτεκτονικές

REFERENCES

- [1] J. Lee, Y. -A. Li, M. -H. Hung and S. -J. Huang, "A Fully-Integrated 77-GHz FMCW Radar Transceiver in 65-nm CMOS Technology," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 12, pp. 2746-2756, Dec. 2010, doi: 10.1109/JSSC.2010.2075250.
- [2] C. Waldschmidt, J. Hasch and W. Menzel, "Automotive Radar — From First Efforts to Future Systems," in *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 135-148, Jan. 2021, doi: 10.1109/JMW.2020.3033616.
- [3] Y. -S. Lin, C. -Y. Lee and C. -C. Chen, "A 9.99 mW low-noise amplifier for 60 GHz WPAN system and 77 GHz automobile radar system in 90 nm CMOS," 2015 *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, 2015, pp. 65-67, doi: 10.1109/RWS.2015.7129714.
- [4] G. Liu, R. Berenguer and Y. Xu, "A MM-Wave Configurable VCO Using MCPW-Based Tunable Inductor in 65-nm CMOS," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 58, no. 12, pp. 842-846, Dec. 2011, doi: 10.1109/TCSII.2011.2172718.