



Modulator Demodulator In Phase Quadrature Dengan Pembawa Frekuensi 50 MHz Berbasis Komponen Diskrit

Suharno², Masbah R.T¹, Siregar, Taswanda Taryo², Kun Wardana³

¹Program Studi Teknik Elektro, Institut Sains dan Teknologi Nasional
Jl. Moh Kahfi II, Jakarta Selatan, DKI Jakarta, Indonesia

²Lembaga Kursus dan Pelatihan Teknologi Cirebon (LKP-TC)
Jl. Kampung Melati No. 6A RT/RW 003/004 Kel/Kec. KEsambi
Cirebon Jawa Barat, Indonesia

*e-mail : abuhamzahsuharno@gmail.com, mrtsiregar2012@istn.ac.id, otantaryo@gmail.com,
kun@indosat.net.id

ABSTRAK

Salah satu bagian terpenting pada akselerator linier adalah Sistem RF. Dua sinyal masukan yang berbeda dapat menghasilkan distorsi yang dapat menyebabkan masalah dalam intermodulasi. Pengaruh kinerja daya RF terhadap noise dan juga evaluasi performa sehingga menghasilkan sinyal yang jelas dan kuat tanpa mengalami distorsi yang signifikan atau mengalami kerugian transmisi. Inphase Quadrature analog modulator demodulator dapat dicapai dengan sinyal pergeseran fase 90° ke input I dan Q, sinyal pembawa menggunakan Variable Control Oscillator atau VCO dengan output tunggal 50MHz. 16 Bit modul ADC dan DAC dioptimalkan sebagai input atau output dengan I/Q analog modulator demodulator. Dalam Penulisan paper digunakan Simulasi ADISIM RF untuk menampilkan hasil dari perancangan desain system RF, dengan dua parameter yaitu Spurious Free Dynamic Range (SFDR) dan IMD (Two Tone Intermodulation Distortion) untuk Transmitter dan satu parameter yaitu Noise Figure (NF) untuk Receiver.

Kata Kunci: I/Q Modulator Demodulator, ADISIM RF, SFDR, IMD, NF

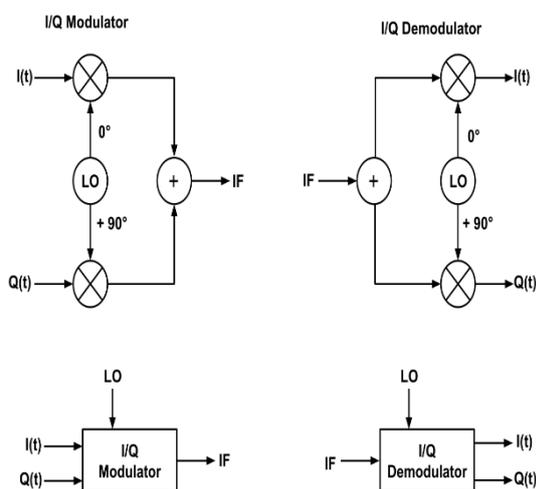
ABSTRACT

One of the most important parts of a linear accelerator is the RF System. Two different input signals can produce distortion which can cause problems in intermodulation. Effect of RF power performance on noise as well as performance evaluation so as to produce a clear and strong signal without significant distortion or transmission loss. The Inphase quadrature analog modulator demodulator can achieve with 90° phase shift signal to I and Q inputs, the carrier signal using a variable oscillator or VCO with a single 50 MHz output. 16 Bit of ADC and DAC module optimized as input or output with I/Q analog modulator demodulator. In this paper, ADISIM RF simulation is used to display the results of the RF system design, with two parameters namely Spurious Free Dynamic Range) and IMD (Two Tone Intermodulation Distortion) for Transmitter and one parameter namely Noise Figure (NF) for Receiver.

Keywords : I/Q Modulator Demodulator, ADISIM RF, SFDR, IMD, NF

1. PENDAHULUAN

Dalam Teknik kelistrikan dan radio, suatu Teknik biasanya digunakan memproses sinyal, dimana sinyal tersebut secara efektif diuraikan menjadi gelombang pembawa, dan aliran data 2 dimensi yang dikenal sebagai data I dan Q. Inphase quadrature mengacu pada dua sinusoid yang memiliki frekuensi yang sama dan 90° di luar fase. Dengan konvensi, sinyal I adalah bentuk gelombang kosinus dan sinyal Q adalah bentuk gelombang sinus. Gelombang sinus (tanpa fase tambahan) digeser 90° relatif terhadap gelombang kosinus. Dengan kata lain bahwa gelombang sinus dan kosinus berbentuk quadratur.



Gambar. 1. IQ modulation and demodulation block diagram

Penguraian ini memiliki sifat yang berguna, laju data aliran IQ mencerminkan data yang sedang dikirim atau diterima, misalnya dalam jutaan bit per detik (MBPS) dan tidak bergantung pada frekuensi pembawa. Oleh karena hal tersebut data IQ banyak digunakan dalam banyak Teknik modulasi.

Sinusoid dengan modulasi sudut dapat didekomposisi atau disintesis dari dua sinusoid termodulasi amplitudo yang diimbangi fasenya dengan seperempat siklus (90° atau $\pi/2$ radian). Ketiga fungsi tersebut tersebut memiliki frekuensi pusat yang sama. Sinusoid termodulasi amplitudo seperti itu dikenal sebagai

Inphase dan Quadrature.

Sinyal I/Q dalam hal ini akan selalu termodulasi amplitudo, tidak termodulasi frekuensi atau fase. Modulasi amplitudo terhadap sinyal I/Q berbeda dengan Teknik modulasi amplitudo seperti pada umumnya, sinyal yang memodulasi sinusoid I/Q tidak digeser sehingga selalu positif, modulasi sinyal I/Q melibatkan penggandaan bentuk gelombang I/Q dengan memodulasi sinyal yang dapat memiliki nilai tegangan negatif, dan terjadi modulasi amplitudo yang dapat menghasilkan pergeseran fasa 180° .

2. Tinjauan Pustaka

2.1.1 Penjumlahan I dan Q (Konsep)

Bentuk gelombang I dan Q ditambahkan, segala bentuk modulasi dapat dilakukan hanya dengan memvariasikan amplitudo dari sinyal I dan Q lalu menjumlahkannya.

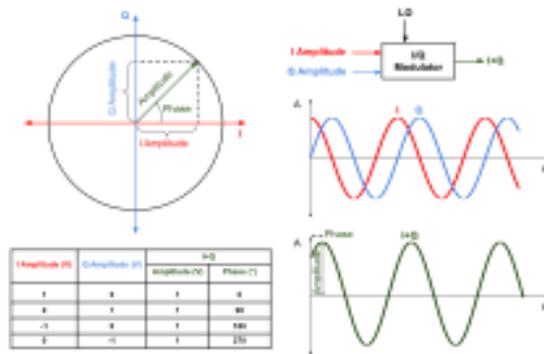
Dalam analisis vektor dengan koordinat polar A , φ dan koordinat Cartesius $x = A \cos(\varphi)$, $y = A \sin(\varphi)$, dapat dipresentasikan sebagai jumlah komponen orthogonal $[x, 0] + [0, y]$. Demikian pula dalam trigonometri, identitas jumlah sudut menyatakan:

$$\sin(x + \varphi) = \sin(x) \cos(\varphi) + \sin(x + \pi/2) \sin(\varphi)$$

Dan dalam analisis fungsional, Ketika x adalah fungsi linier dari beberapa variabel, seperti waktu, komponen ini adalah sinusoidal dan merupakan fungsi ortogonal. Pergeseran fase $x \rightarrow x + \pi/2$ mengubah identitas menjadi:

$$\cos(x + \varphi) = \cos(x) \cos(\varphi) + \cos(x + \pi/2) \sin(\varphi)$$

Dalam hal ini $\cos(x)\cos(\varphi)$ adalah komponen sefasa. Dalam kedua konvensi $\cos(\varphi)$ adalah modulasi amplitudo dalam fase.



Gambar. 2. IQ phasor diagram

2.1.2 Sirkuit arus bolak-balik (AC)

Istilah arus bolak-balik berlaku untuk fungsi tegangan vs waktu yang sinusoidal dengan frekuensi f . Ketika diterapkan pada rangkaian atau perangkat tipikal (linear time-invariant), ini menyebabkan arus yang juga sinusoidal. Secara umum ada perbedaan fase konstan, ϕ , antara dua sinusoid. Tegangan sinusoid input biasanya didefinisikan memiliki fase nol, artinya dipilih secara sewenang-wenang sebagai referensi waktu yang nyaman. Jadi perbedaan fasa dikaitkan dengan fungsi arus, misalnya $\sin(2\pi ft + \phi)$, yang komponen ortogonalnya adalah $\sin(2\pi ft)\cos(\phi)$ dan $\sin(2\pi ft + \pi/2)\sin(\phi)$, seperti yang telah kita lihat. Ketika ϕ terjadi sedemikian rupa sehingga komponen dalam fase adalah nol, sinusoidal arus dan tegangan dikatakan dalam quadrature, yang berarti mereka orthogonal satu sama lain. Dalam hal itu, tidak ada daya listrik rata-rata (aktif) yang dikonsumsi. Alih-alih daya disimpan sementara oleh perangkat dan diberikan kembali, setiap kali $1/2f$ detik. Perhatikan bahwa istilah dalam quadrature hanya menyiratkan bahwa dua sinusoid adalah orthogonal, bukan merupakan komponen dari sinusoid yang lain.

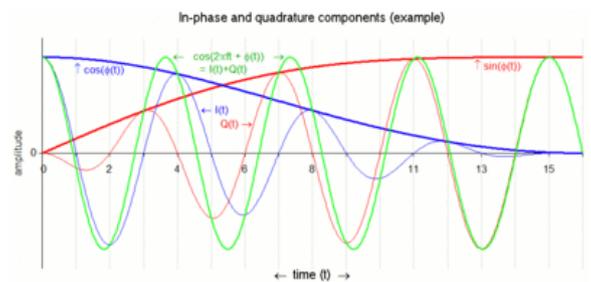
2.1.3 Model Sinyal Sempit

Dalam aplikasi modulasi sudut, dengan frekuensi pembawa f , ϕ juga merupakan fungsi varian waktu, dituliskan:

$$A(t) \cdot \sin[2\pi ft + \phi(t)] = \underbrace{A(t) \cdot \sin(2\pi ft) \cdot \cos[\phi(t)]}_{\text{in-phase}} + \underbrace{A(t) \cdot \overbrace{\sin(2\pi ft + \frac{\pi}{2})}^{\cos(2\pi ft)} \cdot \sin[\phi(t)]}_{\text{quadrature}}$$

Ketika ketiga suku di atas dikaitkan dengan fungsi amplitudo opsional $A(t) > 0$, sisi kiri persamaan dikenal sebagai bentuk amplitudo/fase, dan sisi kanan adalah pembawa kuadrat atau IQ membentuk. Karena modulasi, komponen tidak lagi berfungsi sepenuhnya orthogonal. Tetapi ketika $A(t)$ dan $\phi(t)$ adalah fungsi yang bervariasi secara perlahan dibandingkan dengan $2\pi ft$, asumsi orthogonalitas adalah hal yang umum atau model sinyal sempit.

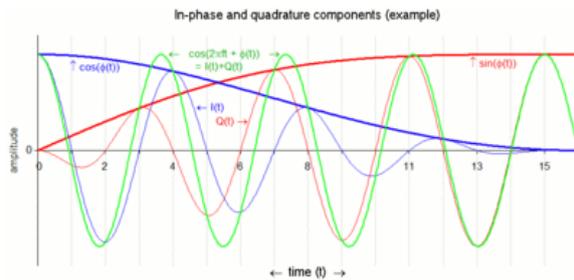
2.1.4 Konvensi Fase IQ



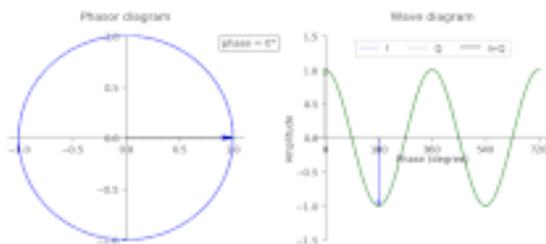
Istilah komponen- I dan komponen- Q adalah cara umum untuk mengacu pada sinyal dalam fase dan quadrature. Kedua sinyal terdiri dari sinusoid frekuensi tinggi (atau pembawa) yang dimodulasi amplitudo oleh fungsi frekuensi yang relatif rendah, biasanya menyampaikan secara informasi.

Kedua pembawa adalah orthogonal dengan I tertinggal Q $1/4$ siklus, atau setara memimpin Q oleh siklus. Perbedaan fisik juga dapat dicirikan dari segi $\phi(t)$:

- $\phi(t) = 0$: Sinyal komposit berkurang menjadi hanya komponen- I, yang menjelaskan istilah dalam fase.
- $\phi(t) = \pi/2$: Sinyal komposit direduksi menjadi komponen Q saja.
- $\phi(t) = 2\pi f_m, f_m > 0$: Modulasi amplitudo adalah sinusoid orthogonal, I memimpin Q dengan $1/4$ siklus.
- $\phi(t) = 2\pi f_m, f_m < 0$: Modulasi amplitudo adalah orthogonal, Q memimpin I dengan $1/4$ siklus.



Gambar 3. Graphic example of the formula The phase modulation ($\varphi(t)$, not shown) is a non-linearly increasing function from 0 to $\pi/2$ over the interval $0 < t < 16$. The two amplitude-modulated components are known as the in-phase component (I, thin blue, decreasing) and the quadrature component (Q, thin red, increasing).

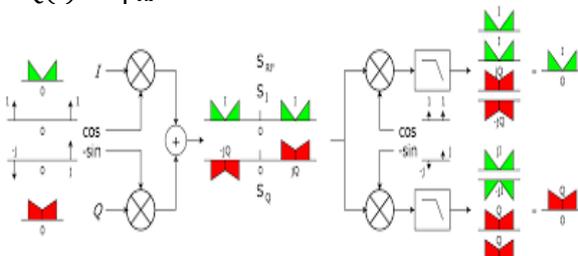


Gambar 4. Phase shifter using IQ modulator

a. I/Q Demodulasi

Pengoperasian demodulator IQ dapat dijelaskan dengan merepresentasikan input RF nya, sinyal $S_{RF}(t)$ sebagai kombinasi dari dua pembawa quadrature termodulasi sideband ganda :

$$S_{RF}(t) = S_I(t) + S_Q(t) = I(t)\cos\varphi_{RFt} - Q(t)\sin\varphi_{RFt}...1$$



Gambar 5. Concept of IQ-Modulation Demodulation

Seperti yang dilustrasikan pada gambar diatas, komponen dala fase $I(t)$ dan komponen quadrature $Q(t)$ adalah sinyal baseband yang dapat dilihat sebagai input untuk pembangkit modulator IQ yang ideal.

Demodulator IQ mencapai rekonstruksi sempurna dari $S_I(t)$ dan $S_Q(t)$. Representasi domain frekuensi dari -90° pergeseran fase sesuai dengan perkalian dengan transformasi Hilbert :

$$H(j\varphi) = -j\text{sgn}(\varphi).....2$$

Ini mengubah spektrum dengan simetri genap di sekitar $\varphi=0$ menjadi spektrum dengan ganjil simetri dan sebaliknya. Spektrum $S_I(t)$ dan $S_Q(t)$ menunjukkan perbedaan simetri; $S_I(t)$ simetri genap, $S_Q(t)$ simetri ganjil. Konversi ke bawah dari komponen input RF genap $S_I(t)$ dengan LO (kosinus) genap mengambil $I(t)$, sedangkan $S_Q(t)$ dengan ganjil LO (sinus) mengambil $Q(t)$. Kombinasi silang genap dan ganjil menghasilkan nol.

Kesalahan φ pada relasi kuadrat antara output LO menyebabkan crosstalk antara saluran I dan Q. Menggunakan saluran fase I sebagai referensi, komponen genap adalah diperkenalkan di Q channel LO:

$$\sin(\varphi_{RFt} + \varphi) = \sin(\varphi_{RFt})\cos\varphi + \cos(\varphi_{RFt})\sin\varphi3$$

Menghasilkan kontribusi $I(t)$ ke output Q channel $Q_{out}(t)$:

$$Q_{out}(t) = Q(t)\cos\varphi + I(t)\sin\varphi.....4$$

3. Studi Komparasi

3.1 Parameter Pengukuran

3.1.1 Spurious Free Dynamic Range (SFDR)

SFDR adalah rasio fundamental kekuatan sinyal terhadap sinyal palsu terkuat di output, hal ini juga didefinisikan sebagai ukuran yang digunakan untuk menentukan konversi analog ke digital dan digital ke analog (ADC dan DAC) dan penerima penerima radio.

SFDR didefinisikan sebagai rasio nilai RMS dari gelombang pembawa f_c (komponen sinyal maksimum) pada input ADC atau output DAC terhadap nilai RMS dari komponen noise atau distorsi harmonik. SFDR biasanya diukur dalam dBc (sehubungan dengan amplitude sinyal pembawa) atau dalam dBFS (sehubungan

dengan rentang skala penuh ADC).

Dalam hal aplikasi penerimaan radio, didefinisikan sedikit berbeda. Referensinya adalah level sinyal minimum yang dapat dideteksi pada input penerima yang dapat dihitung melalui pengetahuan tentang adanya kebisingan (NF noise figure) dan sinyal input bandwidth penerima tau system. Selisih antara nilai ini dan tingkat input yang akan menghasilkan produk distorsi sama dengan sinyal minimum yang dapat dideteksi yang dirujuk ke input sistem (SFDR system). Dalam system RF dimana sinyal palsu keluaran adalah fungsi non linier dari daya masukan .

$$SFDR(dB) = (2/3) * (OIP3 + 173.8 - 10 \log(BW) - NF \text{ Gain}).$$

Atau melalui nilai input

$$SFDR(dB) = (2/3) * (IIP3 + 173.8 - 10 \log(BW) - NF)$$

Dimana:

OIP3 adalah Output referred Third Order Intercept (dBm).

IIP3 adalah Input referred Third Order Intercept (dBm).

-17.8 adalah Thermal Noise Floor (dBm/Hz).

BW adalah Channel atau analisis Bandwidth (Hz).

Gain adalah Gain dari komponen atau sinyal chain (DB)

NF adalah Noise Figure dari komponen atau sinyal chain.

3.1.2 IMD (Two Tone Intermodulation Distortion)

Pengujian Two Tone adalah sarana pengujian komponen dan sistem elektronik, khususnya sistem radio, untuk distorsi intermodulasi. Ini terdiri dari secara bersamaan menyuntikkan dua sinyal sinusoidal dari frekuensi (nada) yang berbeda ke dalam komponen atau sistem. Distorsi intermodulasi biasanya terjadi pada komponen aktif seperti amplifier, tetapi juga dapat terjadi pada beberapa keadaan pada komponen pasif seperti konektor kabel, terutama pada daya tinggi.

Pengukuran dalam pengujian two tone paling umum dilakukan dengan memeriksa keluaran Device under test (DUT) dengan penganalisa spektrum yang dengannya produk intermodulasi dapat diamati secara langsung. Kadang-kadang ini tidak mungkin dengan sistem yang lengkap dan sebagai gantinya konsekuensi dari intermodulasi diamati. Misalnya, dalam sistem radar, hasil dari intermodulasi mungkin menghasilkan target palsu.

$$OIP3 = P_{out} - (IMD3)/2$$

$$IMD3 = 2 \times (P_{out} - OIP3)$$

3.1.3 ADISim RF

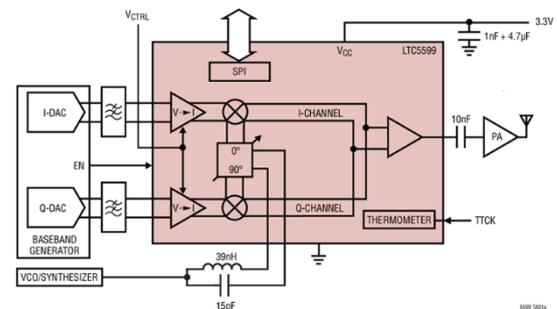
Adalah perangkat simulasi yang dikeluarkan Analog Device, mix and match komponen-komponen RF dan memvisualisasikan level/nilai sinyal, distorsi dan noise.

3.2 Hardware

3.2.1. Transmitter

Pada simulasi pengujian menggunakan beberapa komponen transmit:

a. I/Q Modulator LTC5599



ELECTRICAL CHARACTERISTICS The * denotes the specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at T_c = 25°C, V_{CC} = 3.3V, EN = 3.3V, V_{CTRL} = 3.3V, P_{LO} = 0dBm, BBIN, BBPO, BBMO common mode DC voltage V_{CMDC} = 1.4V_{CC}, I and Q baseband input signal = 20mV_{rms}, 2.1MHz, V_{IN-Peak} = 1 or 0; I and Q 90° shifted, lower sideband selection, all registers set to default values, unless otherwise noted. Test circuit is shown in Figure 13.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
f _{LO}	VCO Frequency	f _{LO1} = 147.5MHz, f _{LO2} = 148MHz, Register 0x00 = 0x52				
S _{20dBm}	RF Port Return Loss			-26		dB
f _{LOMATCH}	LO Match Frequency Range	511 ± 10dB		115 to 272		MHz
Gain	Conversion Voltage Gain	20 + 10log (V _{OUT} /V _{IN}) (at 0dB)		-7.5		dB
P _{OUT}	Absolute Output Power	V _{IN-Peak} = 20mV _{rms} , I and Q		-3.5		dBm
OIP1dB	Output 1dB Compression			5		dBm
OIP2	Output 2nd Order Intercept	(Note 5)		70.5		dBm
OIP3	Output 3rd Order Intercept	(Note 6)		21.7		dBm
NFloor	RF Output Noise Floor	No Baseband AC Input Signal (Note 3)		-155.3		dBm/Hz
SB	Side-Band Suppression	(Note 7)		-61.4		dBc
LOFT	Carrier Leakage (LO Feedthrough)	(Note 7)		-82.8		dBm
2LOFT	LO Feedthrough at 2xLO	EN = Low (Note 7)		-84.8		dBc

2

For more information www.linear.com/LTC5599

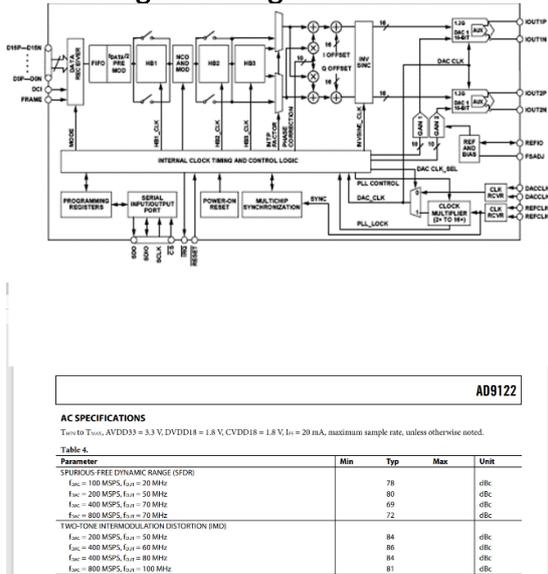


LTC5599

ELECTRICAL CHARACTERISTICS The * denotes the specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at T_c = 25°C, V_{CC} = 3.3V, EN = 3.3V, V_{CTRL} = 3.3V, P_{LO} = 0dBm, BBIN, BBPO, BBMO common mode DC voltage V_{CMDC} = 1.4V_{CC}, I and Q baseband input signal = 20mV_{rms}, 2.1MHz, V_{IN-Peak} = 1 or 0; I and Q 90° shifted, lower sideband selection, all registers set to default values, unless otherwise noted. Test circuit is shown in Figure 13.

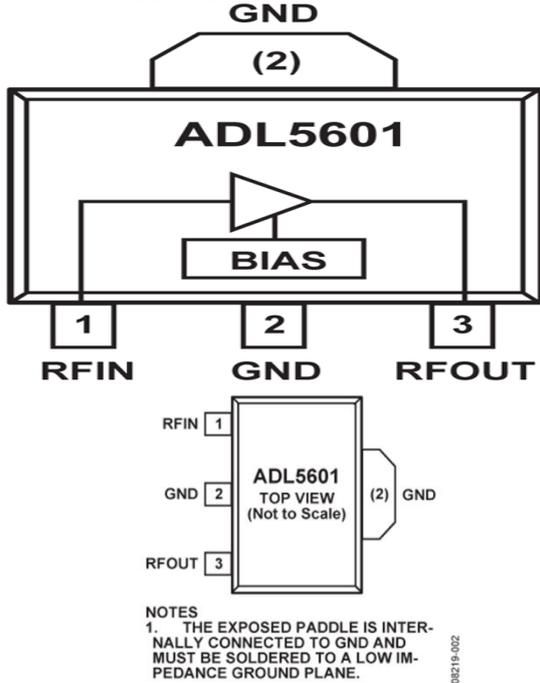
Gambar 6. I/Q Modulator dan spesifikasi IMD LTC5599

b. Dual Digital Analog Converter AD9122V



Gambar 7. DAC dan AC specification SFDR AD9122V

c. Gain Block ADL5601

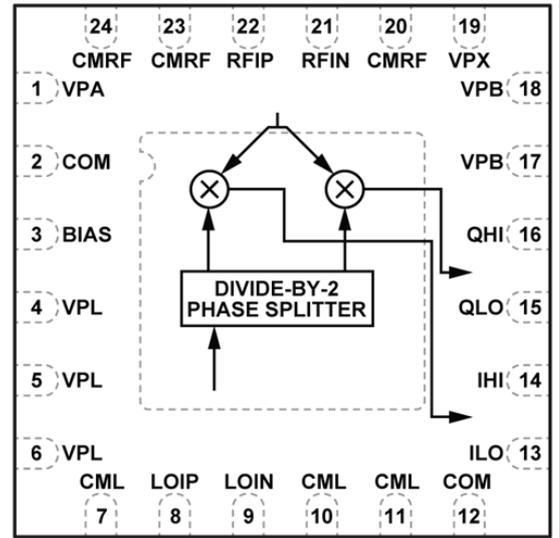


3-LEAD SMALL OUTLINE TRANSISTOR PACKAGE [SOT-89] (RK-3)

Gambar 8. Gain Blok ADL5601

3.2.2 Receiver

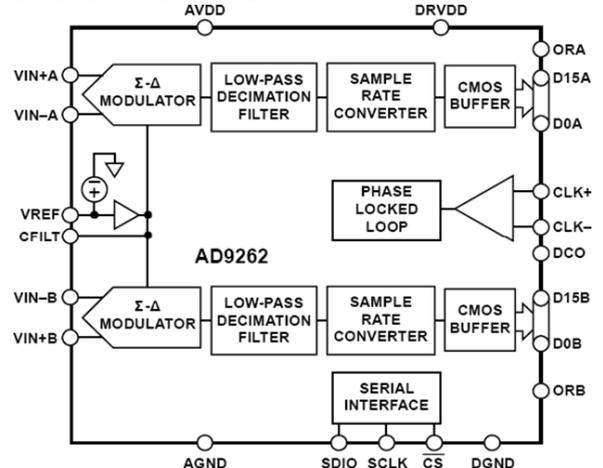
a. I/Q Demodulator



Demodulation Bandwidth	@ 900 MHz 1 V p-p signal 3 dB bandwidth	240	MHz
Quadrature Phase Error	@ 900 MHz	0.4	Degrees
I/Q Amplitude Imbalance		0.1	dB
Output DC Offset (Differential)	0 dBm LO input	±5	mV
Output Common-Mode		VPOS - 2.8	V
0.1 dB Gain Flatness		40	MHz
Output Swing	Differential 200 Ω load	2	V p-p
Peak Output Current	Each pin	12	mA
POWER SUPPLIES			
Voltage	VPA, VPL, VPS, VPX	4.75	5.25
Current	BIAS pin open	180	V
	BIAS = 4 kΩ	157	mA
DYNAMIC PERFORMANCE @ RF = 140 MHz			
Conversion Gain	RFIP, RFIN	4.7	dB
Input P1dB (IP1dB)		13	dBm
Second-Order Input Intercept (IIP2)	-5 dBm each input tone	67	dBm
Third-Order Input Intercept (IIP3)	RFIN, RFIN terminated in 50 Ω, 14LO appearing at the RF port	33	dBm
LO to RF		-100	dBm
RF to LO		-95	dBc
I/Q Magnitude Imbalance	LOIN, LOIP terminated in 50 Ω	0.05	dB
I/Q Phase Imbalance		0.2	Degrees
LO to I/Q	RFIN, RFIN terminated in 50 Ω, 14LO appearing at the RF port	-39	dBm
Noise Figure		12.0	dB
Noise Figure under Blocking Conditions	With a -5 dBm interferer 5 MHz away	14.4	dB

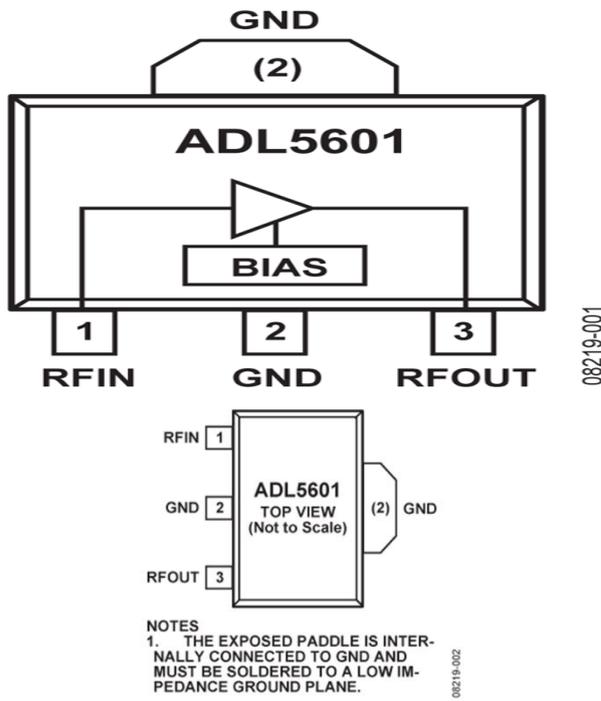
Gambar 9. I/Q Demodulator ADL5387

b. Dual ADC AD9262



Gambar 10. Dual ADC AD9262

c. Gain Block ADL5601

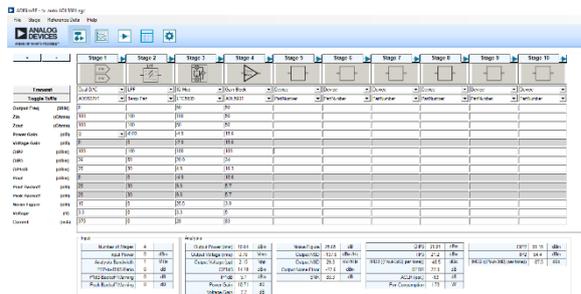


3-LEAD SMALL OUTLINE TRANSISTOR PACKAGE [SOT-89] (RK-3)

Gambar 11. Gain Blok ADL5601

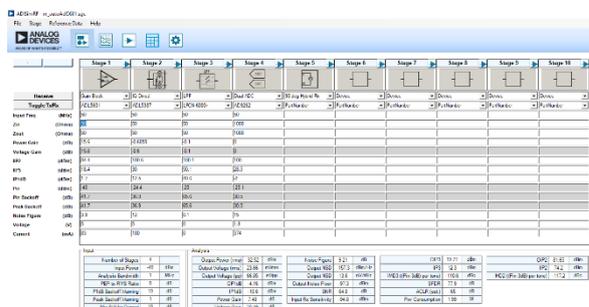
3.3 Parameter Software Simulasi

3.3.1 Transmitter



Gambar 12. Simulation result Tx

3.3.2 Receiver



Gambar 13. Simulation result Rx

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Transmitter

Untuk Nilai SFDR yang tercantum di

datasheet AD9122 adalah senilai 80 dB. Dan untuk nilai SFDR hasil dari simulasi menggunakan ADISIM RF dengan frekuensi yang sama sebesar 50 MHz, tone tunggal 200MSPS dengan sinyal output sebesar 1MHz di dapatkan 72.9 dB. Nilai masih dibawah karakteristik dari komponen tersebut akan tetapi masih lebih baik dari nilai yang dihasilkan pada frekuensi 70MHz.

Untuk nilai IMD3 yang tercantum di datasheet LTC5599 adalah -10.7 dBc, sedangkan hasil dari simulasi didapatkan nilai -48,5 dBc. Nilai ini jauh lebih kecil dari spesifikasi pabrik. Maka system dapat termodulasi dengan baik tanpa adanya distorsi.

4.2 Receiver

Hasil dari simulasi didapatkan nilai Noise Figure sebesar 9,21 dB. Ini menunjukkan hasil lebih baik dari karakteristik komponen ADL5387 dimana tertera Noise Figure sebesar 12dB.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan perbandingan hasil simulasi dengan karakteristik komponen maka system yang dirancang dapat berfungsi dengan baik.

Parameter kelayakan menggunakan dua parameter untuk system Tx dan satu parameter untuk Rx.

Pada system Tx dengan parameter nilai SFDR system menghasilkan kurang lebih 91% dari nilai datasheet, dan untuk nilai IMD3 dihasilkan nilai jauh lebih kecil dari nilai karakteristik.

Pada system Rx nilai NF kurang lebih 75% lebih rendah dari nilai karakteristik, system ini memiliki kualitas amplifier cukup baik, Representasi decibel dari factor kebisingan yang menentukan sensitivitas penguat menurun menjadi sinyal yang masuk karena kebisingan internalnya.

REFERENSI

Thomas H. Lee (1998). The Design of Cmos Radio-Frequency Integrated Circuit. Stanford University

Nickolas Kingsley, Joseph R Guerci (2022)

Radar RF circuit Design second edition.
Artech House 685 Canton St. Norwood,
MA 02062.

Mohammed Almoneer, Patrick Mitran, Slim Boumaiza. I/Q Imbalance Compensation in Wideband Millimeter-Wave Transmitters Using a Single Undersampling ADC: IEEE Transactions On Circuits and Systems-I: Regular Papers, Vol 67, No. 8. August 2020

Partaha Pratim Nandy, Anindya Roy, Sarbajit Pal, Hemendra Kumar Pandey. Development of EPICS Enabled Analog I-Q Based Low Level RF Control System. 5th International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano Technology (IEMTech). 20221.

Mohammad Abdi Abyaneh, Bernard Huyart, Jean-Christophe Cousin. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.

Vittorio Rampa. I/Q Compensation of Broadband Direct-Conversion Transmitters. IEEE Transactions On Wireless Communications , vol. 13, No. 6, June 2014.

Analog Device datasheet