

**SKRIPSI**

**PEMODELAN *NULL-NOISE* PADA *FUTURE DIGITAL TRANSMITTER*  
*SYSTEM 5G* (UNTUK MENGATASI DISTORSI PADA SPEKTRUM)**



*Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan  
program Strata Satu Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik*

*Universitas Hasanuddin*

*Makassar*

Disusun Oleh:

**ANDI NURFAIDAH UTARIM**

**D041171011**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2021**



## LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

### PEMODELAN NULL-NOISE PADA FUTURE DIGITAL TRANSMITTER SYSTEM 5G (UNTUK MENGATASI DISTORSI PADA SPEKTRUM)

Disusun dan diajukan oleh

**ANDI NURFAIDAH UTARI.M**

**D041 17 1011**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi  
Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada Tanggal 12 Juli 2021

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT  
19691026 199412 2 001

Merna Baharuddin, S.T., M.Tel.Eng., Ph.D  
19751205 200501 2 002

Ketua Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.  
19691026 199412 2 001



## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA TULIS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Andi Nurfaidah Utari.M  
Nim : D041 171 011  
Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul

### **PEMODELAN NULL-NOISE PADA FUTURE DIGITAL TRANSMITTER SYSTEM 5G (UNTUK MENGATASI DISTORSI PADA SPEKTRUM)**

Ini adalah benar-benar karya saya sendiri dan saya tidak melakukan plagiarism atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika yang berlaku dalam tradisi keilmuan. Atas pernyataan ini saya siap menerima tindakan/sanksi yang dijatuhkan kepada saya apabila dikemudian ditemukan pelanggaran atas etika akademik dalam karya saya ini, atau ada klaim terhadap keaslian karya saya ini.

Gowa, 15 Juli 2021

Yang Membuat Pernyataan,



Andi Nurfaidah Utari.M

D041171011



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas seluruh kelimpahan rahmat-Nya yang tidak pernah berhenti, serta taufik dan hidayahnya, sehingga saya dapat menyelesaikan seluruh rangkaian dari tugas akhir ini. Tujuan utama dari penulisan tugas akhir ini tentu sebagai syarat menutup Program Strata-1 Departemen Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Saya menyadari bahwa tidak menutup kemungkinan masih terdapat banyak kekeliruan dari tugas akhir ini, semoga seluruh pembaca dapat memaklumi dan mengambil pelajaran dari kesalahan tersebut. Selama penyusunan tugas akhir ini, penulis banyak dihadapkan dengan berbagai hambatan, akan tetapi berkat adanya bimbingan, dukungan dan bantuan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Secara singkat, tugas akhir ini mendemonstrasikan pembuktian konsep tentang solusi *digital-upconverter* berbasis *cognitive radio* untuk optimasi *distorsi cancellation* pada kategori *spectrum mask* 5G. Tugas akhir ini memuat sebuah pemodelan *null-noise* pada sistem pemancar digital yang akan diimplementasikan pada teknologi 5G mendatang.

Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat membawa manfaat bagi siapapun yang membacanya. Kepada seluruh pihak yang sudah saya sita waktu dan tenaganya demi terselesaikannya tugas akhir ini, terima kasih banyak, saya berhutang banyak pada kalian.

Andi Nurfaidah Utari.M



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN SAMBUL</b>	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	ii
<b>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA TULIS</b>	iii
<b>KATA PENGANTAR</b>	vi
<b>DAFTAR ISI</b>	v
<b>ABSTRAK</b>	viii
<b>ABSTRACT</b>	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	x
<b>DAFTAR TABEL</b>	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	5
I.3 Tujuan Penelitian	5
I.4 Manfaat Penelitian	5
I.5 Batasan Masalah	6
I.6 Metode Penelitian	6
I.7 Sistematika Penulisan	7
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	9
II.1 Digital Wireless Communication System	9
Teknologi 5G	9
Konsep Teknologi 5G	10
Arsitektur 5G	12



II.3	Digital Transmitter System	12
II.4	Sigma-Delta ( $\Sigma\Delta$ ) Modulator	14
II.5	Arsitektur Transmitter ( $\Sigma\Delta$ ) Upconverters	15
II.5.1	Bandpass $\Sigma\Delta$ Upconverters	15
II.5.2	Polar $\Sigma\Delta$ Upconverters	17
II.6	Cartesian $\Sigma\Delta$ Upconverters	20
II.7	Distorsi Harmonik	22
II.8	Modulasi Digital (PWM/PPM)	22
II.8.1	PWM (Pulse Width Modulation)	23
II.8.2	PPM (Pulse Position Modulation)	23
II.9	Fast Fourier Transform (FFT)	24
II.10	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	25
II.11	Prinsip Pembatalan Interferensi RF (RF Interference Cancellation)	28
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>		32
III.1	Jenis Penelitian	32
III.2	Waktu Penelitian	32
III.3	Lokasi Penelitian	32
III.4	Teknik Pengujian dan Evaluasi	32
III.5	Alur Penelitian	34
III.5.1	Langkah Kerja Penyelesaian Masalah dan Penyesuaian Metode	34
III.5.1.1	Parameter Penelitian	35



Diagram Alur	36
Alur Kerja	36

III.5.2.2 Alur Pikir	37
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>38</b>
IV.1 Perbandingan Karakteristik Delta Modulasi dan Delta Sigma Modulasi (MOD1)	38
IV.1.1 Delta Modulasi	38
IV.1.2 Delta Sigma Modulasi (MOD1)	41
IV.1.3 Perbandingan Kuantisasi Sinyal dan Output Spectrum Delta Modulasi dan Delta Sigma Modulasi (MOD1)	45
IV.2 Blok $Q_R$ dan $Q_\theta$ menggunakan Kuantisasi Genap (EVEN)	48
IV.2.1 Blok $Q_R$ menggunakan Kuantisasi Genap (EVEN)	48
IV.2.2 Blok $Q_\theta$ menggunakan Kuantisasi Genap (EVEN)	51
IV.3 Hasil Simulasi RF Signal	56
IV.3.1 Frekuensi 2,3 GHz (Output Spectrum RF Signal)	57
IV.3.2 Frekuensi 3.5 Ghz (Output Spectrum RF Signal)	60
<b>BAB V PENUTUP</b>	<b>64</b>
V.1 Kesimpulan	64
V.2 Saran	65
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>66</b>
<b>LAMPIRAN</b>	<b>70</b>



## ABSTRAK

Penelitian ini menawarkan prinsip dasar dan pembuktian konsep tentang solusi *digital-upconverter* berbasis *cognitive radio* untuk optimasi *distorsi cancellation* pada kategori *spectrum mask* 5G. Solusi ini memiliki kemampuan baru berupa formulasi *green*-infrastruktur berbasis *digital signal processing* (DSP) yang lebih handal karena sangat fleksibel, linear dan berdaya rendah. Infrastruktur *transmitter digital* RF berbasis struktur *Sigma-Delta* ( $\Sigma\Delta$ ) diusulkan dengan menangani teknologi koneksi nirkabel 5G. Salah satu mekanisme menuju digitalisasi pemancar-penerima (Tx-Rx) melalui *upconverter*-RF adalah memahami aturan komputasi sebagai solusi yang tepat pada permasalahan distorsi. Penyebab terjadinya distorsi pada *spectrum*-RF di arsitektur *upconverter*-RF adalah pada proses kuantisasi. Oleh karena itu, dilakukan simulasi pemodelan sistem pada *software* matlab agar mampu mengatasi permasalahan distorsi tersebut. Pada penelitian ini menggunakan skema penelitian yang telah dirancang terdiri atas filter modulator, blok kuantisasi polar *even* (genap), dan blok PWM/PPM menuju RF output. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan struktur Cartesian  $\Sigma\Delta$  modulator orde-1 mampu menekan *noise floor*, membentuk *noise* shaping, dan noise yang terbentuk berhasil di *null*-kan disekitar chanel data yang diinginkan. Semakin kecil nilai OSR yang digunakan, maka performansi pada output power spectrum yang dihasilkan juga semakin baik.

*Kata kunci* : *spectrum*-RF, *upconverter*-RF, *delta sigma* modulator, *distorsi cancellation*, *null*-noise



## ABSTRACT

This research offers the basic principles and proof of concept for a digital-upconverter solution based on cognitive radio for optimizing distortion cancellation in the 5G spectrum mask category. This solution has a new capability in the form of a green-infrastructure formulation based on digital signal processing (DSP) which is more reliable because it is very flexible, linear and low power. Sigma-Delta ( $\Sigma\Delta$ ) structure-based RF digital transmitter infrastructure is proposed by addressing 5G wireless connection technology. One of the mechanisms towards digitizing the transmitter-receiver (Tx-Rx) through upconverter-RF is to understand the computational rules as the right solution to the distortion problem. The cause of distortion in the RF-spectrum in the upconverter-RF architecture is the quantization process. Therefore, a simulation of system modeling in Matlab software was carried out in order to be able to overcome the distortion problem. This research uses a research scheme that has been designed consisting of a modulator filter, a polar-even quantization block, and a PWM/PPM block to the RF output. The results showed that the use of an order 1 Cartesian modulator structure was able to suppress noise floor, form noise shaping, and the noise formed was successfully nullified around the desired channel data. The smaller the OSR value used, the better the performance on the output power spectrum produced is also getting better.

*Keywords : spectrum-RF, upconverter-RF, delta sigma modulator, distorsi cancellation, null-noise.*



## DAFTAR GAMBAR

- Gambar II.1 Lapisan jaringan terminal selular 5G
- Gambar II.2 Desain Ponsel 5G
- Gambar II.3 Linear z-domain pada  $\Sigma\Delta$  modulator (MOD1)
- Gambar II.4 Noise-Shaping Function untuk  $\Sigma\Delta$  modulator
- Gambar II.5 Band-pass  $\Sigma\Delta$  upconverter (MOD2)
- Gambar II.6 Band-pass  $\Sigma\Delta$  upconverters dengan dua low-pass  $\Sigma\Delta$
- Gambar II.7 Polar  $\Sigma\Delta$  upconverters berbasis burst-mode
- Gambar II.8 Polar  $\Sigma\Delta$  upconverters
- Gambar II.9 Polar  $\Sigma\Delta$  upconverters
- Gambar II.10 Blok diagram cartesian sigma delta
- Gambar II.11 Sinyal PWM
- Gambar II.12 Sinyal PPM
- Gambar II.13 Spectrum (a) sinyal WDM atau FDM (b) sinyal, OFDM
- Gambar II.14 Diagram Blok Sistem Dasar Sistem Pembatalan Interferensi RF
- Gambar II.15 Implementasi Praktis dari Sistem Pembatalan Interferensi RF 2  
Radio
- Gambar II.16 Tipikal Kopling Antena v Frekuensi
- Gambar II.17 Tipikal Penundaan Grup v Frekuensi
- Gambar II.18 Tipikal Pembatalan Karakteristik
- II.1 Skenario arsitektur cartesian  $-\Sigma\Delta$ .
- II.2 Skema Penelitian
- II.3 Diagram Alir Penelitian



- Gambar III.4 Model Algoritma Penelitian
- Gambar IV.1 Blok Diagram z-domain Delta Modulasi
- Gambar IV.2 Hasil kuantisasi 1-bit pada Delta Modulasi
- Gambar IV.3 Blok Diagram z-domain DS MOD1
- Gambar IV.4 Hasil kuantisasi 1-bit pada Delta Modulasi
- Gambar IV.5 Perbandingan Hasil Kuantisasi 1-bit pada Delta Modulasi dan Delta Sigma Modulasi
- Gambar IV.6 Output Spektrum Frekuensi (a) Delta Modulasi, dan (b) Delta Sigma Modulasi
- Gambar IV.7 Perbandingan Output Spectrum Frekuensi DS dan DSM
- Gambar IV.8 Pola kuantisasi amplitude dengan jumlah periode clock genap (even number) pada  $OSR_{RF} = 4$
- Gambar IV.9 Pola kuantisasi amplitude dengan jumlah periode clock genap (even number) pada  $OSR_{RF} = 8$
- Gambar IV.10 Pola kuantisasi amplitude dengan jumlah periode clock genap (even number) pada  $OSR_{RF} = 16$
- Gambar IV.11 Polar Plane Scale pada Kuantisasi Genap (Even)  $OSR = 4$
- Gambar IV.12 Polar Plane Scale pada Kuantisasi Genap (Even)  $OSR = 8$
- Gambar IV.13 Polar Plane Scale pada Kuantisasi Genap (Even)  $OSR = 16$
- Gambar IV.14 Simulasi 1 Output Spectrum RF Signal 2,3 GHz, pada (a)  $OSR = 4$ , (b)  $OSR = 8$ , dan (c)  $OSR = 16$
- Gambar IV.15 Simulasi 2 Output Spectrum RF Signal 2,3 GHz, pada (a)  $OSR = 4$ , (b)  $OSR = 8$ , dan (c)  $OSR = 16$



Gambar IV.16 Simulasi 3 Output Spectrum RF Signal 2,3 GHz, pada (a) OSR 4,  
(b) OSR 8, dan (c) OSR 16

Gambar IV.17 Simulasi 1 Output Spectrum RF Signal 3,5 GHz, pada (a) OSR 4,  
(b) OSR 8, dan (c) OSR 16

Gambar IV.18 Simulasi 2 Output Spectrum RF Signal 2,3 GHz, pada (a) OSR 4,  
(b) OSR 8, dan (c) OSR 16

Gambar IV.19 Simulasi 3 Output Spectrum RF Signal 2,3 GHz, pada (a) OSR 4,  
(b) OSR 8, dan (c) OSR 16



## DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Tumpukan protokol untuk 5G

Tabel IV.1  $\hat{R}_Q$  untuk OSR yang berbeda

Tabel IV.2 Hasil Perhitungan Threshold untuk Amplitudo pada Even-Polar Plane

Tabel IV.3 Hasil Kuantisasi Fasa Even-Polar Plane

Tabel IV.4 Hasil Perhitungan Threshold fasa pada Even-Polar Plane

Tabel IV.5 Noise Power Spectrum pad Frekuensi 2,3 GHz

Tabel IV.6 Noise Power Spectrum pad Frekuensi 3,5 GHz



# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Di Indonesia, era Generasi 5 (5G) sistem komunikasi pita lebar (broadband) *Gigabit per second* kini sudah digaungkan sebagai migrasi lanjutan dari standar telekomunikasi *broadband* Generasi 4 (4G). Parameter standar dalam proses migrasi 4G ke 5G adalah *frequency carrier* yang akan diaplikasikan pada kisaran 6-100 GHz dengan signal bandwidth diatas 20 MHz. Memasuki tahun 2020, sejauh ini terdapat tiga kandidat pita frekuensi yang akan digunakan untuk penerapan 5G di Indonesia yaitu 3,5 GHz, 26 GHz dan 28 GHz. Namun persiapan infrastruktur spektrum ini tidaklah begitu mudah diaplikasikan karena ternyata frekuensi 3,5 GHz misalnya masih digunakan oleh sistem satelit untuk televisi, perbankan dan telekomunikasi, sedangkan dua kandidat lainnya masih rentang terhadap distorsi besar yang akan dihadapinya. Terjadinya kelangkaan spektrum ini menjadi masalah utama dalam pengembangan sistem generasi baru 5G. Oleh karena itu, diperlukan sebuah metode terbaru solusi *frequency sharing* [1] serta studi mendalam tentang dampak distorsi yang ditimbulkannya sehingga peran teknologi dapat terintegrasi baik saat peluncuran 5G mendatang [2].

Perkembangan teknologi nirkabel yang diintergerasikan dari *peripheral*

*hardware* menuju *software* adalah goal digitalisasi perangkat sistem *transceiver* telekomunikasi (Tx/Rx) saat ini. Teknologi nirkabel wireless *4G* kini dan *5G* mendatang menawarkan data dan *streaming* video



dengan kualitas yang tinggi dan daya tampung data yang lebih besar dibandingkan dengan 3G. Salah satu konsep digitalisasi *transceiver* adalah sistem pengolahan digitalisasi sinyal melalui mekanisme *Software Defined Radio* (SDR). SDR lebih mendekati pada eliminasi fungsi radio konvensional melalui *digital signal processing* (DSP) serta mudah menyesuaikan jenis standar apapun dalam implementasi instrument telepon seluler. Dengan beralihnya komponen-komponen proses signal digital kemudian makin memudahkan terintegrasinya keseluruhan sistem yang dioperasikan sebagai perangkat lunak [3].

Selain itu, dampak penting utama saat terjadi migrasi tersebut adalah diperlukannya memori *power amplifier* (PA) pada infrastruktur radio Tx/Rx (pengirim dan penerima) yang semakin linear dan berdistorsi rendah. Dalam laporan [4], komponen- komponen *radio frequency* (RF) pada *radio base station* (RBS) seperti *upconverter* dan unit penguat PA telah mendominasi 70% dari keseluruhan kebutuhan daya pada RBS tersebut. Lebih lanjut lagi bahwa komponen-komponen dalam *base transceiver station* (BTS) menggunakan hampir 55% dari total pembiayaan daya elektrik operasional bagi operator telekomunikasi radio. Dengan demikian, bagi operator telekomunikasi radio sistem infrastruktur *broadband* 5G mendatang tetap harus akan mengeluarkan biaya yang diperkirakan 40% khusus diperuntukan bagi pembiayaan di unit transmisi RF dan penerimaan signal *mobile phone*.

h karena itu efisiensi konsumsi *energy* saat ini telah menjadi faktorimbangan dalam desain infrastruktur masa depan Tx/Rx RF [4].



Bertambahnya *signal bandwidth* yang akan diaplikasikan berdampak pula pada ketidakseimbangan (*mismatches*) antara sensitivitas *envelope signal* terhadap *delay* transmisi [5]. Keberadaan sistem jalur RF seperti jaringan seluler, akses *local area network* (LAN) nirkabel, dan sistem *wireless broadband* saat ini memang dituntut untuk melaksanakan komunikasi dengan kecepatan data yang sangat tinggi. Di Indonesia, implementasi 4G masih menyisakan konflik antar tuntutan kebutuhan data *rate* yang lebih tinggi dengan keterbatasan spektrum radio. Teknologi *long term evolution* 4G atau LTE 4G berbasis *single carrier- orthogonal frequency division multiplexing* (SC-OFDM) ini pun belum bisa diselenggarakan sepenuhnya di Indonesia terkait masalah pengalokasian frekuensi dalam *spectrum mask* yang sudah cukup rapat. Walaupun OFDM hadir sebagai teknik transmisi *multicarrier* yang mampu memberikan solusi handal terhadap tuntutan akses layanan kecepatan tinggi secara *realtime* dengan performansi yang baik bagi LTE 4G. Namun, nilai *peak-to-average power ratio* (PAPR) telah menimbulkan kenonlinearan pada sistem penguat daya PA pada sisi transmiternya. *Distorsi nonlinear* menyebabkan intermodulasi, dan efeknya ialah *subcarrier* tidak lagi *orthogonal*. Selain itu sistem ini juga telah meningkatkan kompleksitas pada perangkat *converternya*; *analog-to-digital and digital-to-analog converters* (ADC/DAC).

Usulan penelitian ini menawarkan prinsip dasar dan pembuktian konsep yang solusi *digital-upconverter* berbasis *cognitive radio* untuk optimasi *distorsi cancellation* pada kategori *spectrum mask* 5G. Solusi ini memiliki



kemampuan baru berupa formulasi *green*-infrastruktur berbasis *digital signal processing* (DSP) yang lebih handal karena sangat fleksibel, linear dan berdaya rendah [6,7,8]. Infrastruktur *transmitter digital* RF berbasis struktur *Sigma-Delta* ( $\Sigma\Delta$ ) akan diusulkan dengan menangani teknologi koneksi nirkabel 5G *Internet of Things* (IoT) dengan *latency* (latensi) kecil [9], sebagaimana yang dikehendaki pada *Industry 4.0*. Arsitektur *transmitter* RF berstruktur  $\Sigma\Delta$  ini menggantikan struktur komponen analog seperti *low pass filter* (LPF), *modulator*, *band pass filter* (BPF), dan *local oscillator* (LO) [10].

Struktur  $\Sigma\Delta$  juga dapat digunakan untuk mengelola skema modulasi yang cukup kompleks pelaksanaannya, seperti pada *orthogonal frequency division multiplexing access* (OFDMA), sehingga dapat menghasilkan luaran *waveform*, deretan *binary* bit ‘on’-‘off’, yang beroperasi tepat pada frekuensi *carriernya*; dan *output waveformnya* dapat *men-drive* penguat-penguat kelas linear *switch mode power amplifier* (SMPA) yang lebih linear [11]. Dengan demikian, penelitian ini akan mengungkapkan sebuah luaran berupa *novelty* melalui teori terbaru (*proof of concept*) dengan kajian mendalam seluruh fenomena distorsi dan analisis prediksi *magnitude* pada produk distorsi dengan akurasi simetrik yang tepat sehingga memungkinkan adanya solusi menghilangkan produk distorsi tersebut yang akan dikenal dengan *distorsion cancellation*. Hal ini pula dapat menjadi tolak ukur yang sangat penting untuk mencapai efisiensi tinggi dan linearitas terbaik dalam *men-drive* penguat-

kuat PA kelas non-linear *switch mode* (SMPA) bagi infrastruktur *green*-  
S 5G yang akan digunakan. Keseluruhan pemodelan ini sangat



membutuhkan aplikasi teknologi melalui test bench *field-programmable gate array* (FPGA) akan digunakan dalam pembuktian konsep pemodelan ini; implementasi test bench ini akan menggunakan frekuensi real kisaran GHz (standar frekuensi 5G), [12] [13] sesuai dengan standarisasi *spectrum mask* yang tersedia bagi broadband 5G, terutama *spectrum mask* yang berlaku dalam skala nasional wilayah radio Indonesia.

## I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana mengetahui karakteristik  $\Sigma\Delta$  modulator sebagai fungsi *noise shaping*?
2. Bagaimana cara meminimalisasi *null-noise* pada sistem *future Digital Transmitter 5G*?"

## I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin di capai dalam penelitian ini adalah :

1. Mengetahui karakteristik  $\Sigma\Delta$  modulator sebagai fungsi *noise shaping*.
2. Meminimalisasi *null-noise* pada sistem *future Digital Transmitter 5G*.

## I.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat seperti yang diuraikan di bawah ini:

1. Bagi masyarakat dan mahasiswa, penelitian ini diharapkan ke depannya dapat memberikan manfaat untuk perangkat telekomunikasi nirkabel 5G yang dapat secara luas.



2. Bagi institusi Universitas Hasanuddin, penelitian ini dapat berguna sebagai referensi ilmiah dalam pengembangan jaringan *wireless communication system 5G*.
3. Bagi peneliti, penelitian ini memiliki manfaat untuk menambah wawasan dan menjadi sumber data dalam pembuatan jaringan *wireless communication system 5G* dengan implementasi berupa pengembangan pemodelan *null-noise* pada *future Digital Transmitter System 5G*.

### **I.5 Batasan Masalah**

Penelitian ini membatasi masalah penulisan guna mengoptimalkan hasil penelitian. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini memusatkan penelitian hanya pada cara meminimalisasi *null-noise* pada *future Digital Transmitter System* untuk aplikasi perangkat *transceiver* sistem telekomunikasi nirkabel 5G pada frekuensi 2,3 GHz dan 3,5 GHz.

### **I.6 Metode Penelitian**

Untuk menghasilkan tugas akhir yang komprehensif, maka dalam penelitian akan digunakan metode sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Tahap awal yang dilakukan ini yaitu mencari sumber-sumber referensi dan materi pendukung untuk dijadikan sebagai acuan dalam penyelesaian tugas akhir dimana merujuk pada buku-buku, jurnal-jurnal nasional maupun internasional seperti yang tertera pada daftar tinjauan pustaka sehingga bisa dipelajari dalam pengerjaan dan penulisan tugas akhir.



## 2. Pengujian dan Analisis

Tahap kedua dari penelitian ini yaitu kegiatan pengujian dan analisis dimaksudkan untuk memperoleh data-data aktual yang merupakan hasil pengukuran dan observasi dan simulasi secara langsung menggunakan *software* MATLAB.

## 3. Diskusi dan Konsultasi

Melakukan dialog secara langsung kepada pembimbing dan pihak-pihak yang berkompeten di bidang terkait untuk mendapatkan pengetahuan mengenai penelitian yang dilakukan.

## 4. Penarikan Kesimpulan

Tahap akhir dari penelitian ini ialah menarik kesimpulan dari analisis data mengenai semua masalah yang dibahas.

### I.7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian dan penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

#### BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisikan gambaran umum penelitian yang dilakukan meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan.

#### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini membahas tentang teori serta fakta-fakta yang diambil sebagai

referensi terkait dengan penelitian yang dilakukan yang berguna dalam menganalisa kasus.



### BAB III METODOLOGI PENULISAN

Pada bab ini berisikan mengenai jenis penelitian, waktu dan lokasi penelitian, teknik pengumpulan data, teknik analisis, serta alur penelitian

### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai hasil penelitian, masalah, dan pemecahannya.

### BAB V PENUTUP

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian yang diperoleh pada bab sebelumnya dan saran-saran yang dapat berguna dalam pengembangan studi kasus pada tugas akhir ini di masa akan datang.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### II.1 Digital Wireless Communication System

*Digital wireless communication system* atau sistem komunikasi nirkabel digital merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang berkembang dengan cepat dan semakin signifikan. Meskipun demikian, teknologi ini masih memiliki beberapa kekurangan. Hal ini di diikuti oleh semakin meningkatnya permintaan kompleksitas tipe data yang dikirim oleh berbagai pengguna perangkat nirkabel. Akibatnya, diperlukan lebar pita yang cukup besar dengan cara meningkatkan jumlah spektrum [14].

Area layanan sistem komunikasi nirkabel dipartisi ke dalam sebuah domain layanan terhubung yang dikenal sebagai sel, di mana unit nirkabel berkomunikasi melalui suatu tautan radio dengan stasiun pangkalan (BS) yang melayani sel. Stasiun basis ini digabungkan ke jaringan darat, misalnya melalui *Mobile Switching Center* (MSC) yang terhubung ke sejumlah stasiun basis yang telah tersebar di seluruh area layanan. Dalam industri komunikasi nirkabel, penyedia layanan biasanya memberikan dua atau lebih pita frekuensi yang terpisah untuk digunakan dalam transmisi nirkabel dan penerimaan saluran komunikasi RF [15].

#### II.2 Teknologi 5G



Teknologi 5G (generasi kelima) adalah istilah yang digunakan untuk menyebut generasi kelima sebagai fase berikutnya dari standar

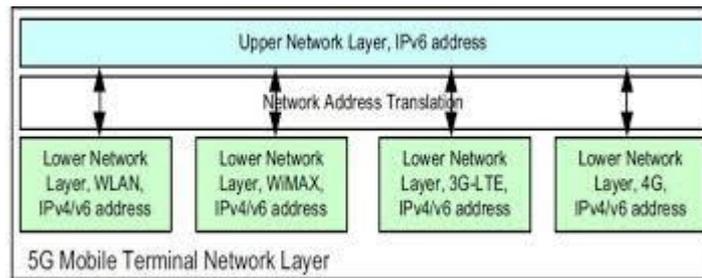
telekomunikasi seluler. Dunia industri dan komunikasi di Indonesia akan maju selangkah lagi dengan hadirnya koneksi jaringan generasi kelima (5G). Jaringan 5G merupakan suatu evolusi dari jaringan internet 4G LTE (*Long Term Evolution*), yang saat ini masih banyak diadopsi di *smartphone* atau gawai. Kedepannya, jaringan 5G akan menawarkan internet nirkabel yang lebih cepat untuk berbagai keperluan. Dengan koneksi 5G, kecepatan internet akan mempersingkat waktu dimana dapat mencapai 4 *Gigabits per second*. Kecepatan itu setara 500 Megabytes per second yang dapat membuat pengguna dapat mengunduh film beresolusi 4K 100GB dalam waktu kurang dari 4 menit, game berkapasitas 50GB kurang dari 2 menit, perangkat lunak, dan berbagai konten lainnya [16].

## II.2.1 Konsep Teknologi 5G

Tabel II.1. Standar protokol untuk 5G [17].

Application Layer	Application (Services)
Presentation Layer	
Session Layer	Open Transport Protocol (OTP)
Transport Layer	
Network Layer	Upper Network Layer
	Lower Network Layer
Data Link Layer (MAC)	Open Wireless Architecture (OWA)
Physical Layer	





Gambar II.1. Lapisan jaringan terminal selular 5G [17].

Lapisan kontrol akses OSI lapisan 1 dan OSI lapisan dua yang menentukan teknologi nirkabel. Lapisan jaringan akan menjadi IP (*Internet Protocol*), karena tidak memiliki persaingan saat ini pada level tersebut. IPv4 (versi 4) tersebar di seluruh dunia dan terdapat beberapa masalah seperti ruang alamat yang terbatas dan tidak memiliki kemungkinan nyata untuk dukungan QoS per aliran.

Untuk jaringan seluler dan nirkabel berbeda dari jaringan berkabel terkait dengan lapisan *transport*. Modifikasi dan adaptasi TCP (*Transmission Control Protocol*) diusulkan untuk jaringan seluler dan nirkabel, yang mengirimkan ulang segmen TCP yang hilang ataupun rusak hanya melalui tautan nirkabel. Untuk terminal seluler 5G akan cocok jika memiliki lapisan pengangkut yang memungkinkan diunduh dan dipasang. Sedangkan pada aplikasinya, permintaan utama dari terminal seluler 5G adalah dengan menyediakan manajemen QoS yang cerdas melalui berbagai jaringan [17].



## II.2.2 Desain Ponsel 5G



Gambar II.2. Desain Ponsel 5G [17].

Gambar II.2 menunjukkan desain ponsel 5G yang sedang dikembangkan untuk mengakomodasi QoS dan persyaratan tarif yang akan ditetapkan oleh aplikasi yang akan datang. Definisi 5G adalah untuk memberikan cakupan RF yang sangat memadai, dan banyak bit / Hz serta agar dapat menghubungkan semua jaringan heterogen nirkabel untuk memberikan pengalaman telekomunikasi yang mulus dan konsisten kepada pengguna jaringan nirkabel [17].

## II.3 Digital Transmitter System

*Digital transmitter system* merupakan pemancar nirkabel yang kemudian digunakan dalam sistem komunikasi RF menggunakan penguat

RF sebagai komponen kunci dan merupakan sumber utama nonlinear di seluruh sistem. Penguat daya RF adalah sebuah perangkat yang mencoba mereplikasi sinyal RF yang ada pada sebuah masukan, dimana



menghasilkan sinyal keluaran dengan tingkat daya yang jauh lebih tinggi. Peningkatan daya dari input ke *output* disebut keuntungan dari penguat. Saat penguatan konstan pada rentang dinamis dari sinyal input, maka penguat dikatakan linear. *Amplifier* memiliki kapasitas yang sangat terbatas dalam hal daya yang dikirimkan disebabkan gain dan variasi fase, terutama saturasi pada daya tinggi, yang akan membuat semua *amplifier* praktis nonlinear ketika daya input bervariasi. Rasio daya distorsi yang dihasilkan relatif terhadap daya sinyal yang dikirimkan adalah ukuran non-linearitas penguat. Dalam sistem komunikasi RF, non-linearitas maksimum yang dapat dialokasikan penguat hanya dapat ditentukan oleh lembaga pemerintah seperti FCC atau ITU. Karena *amplifier* secara inheren nonlinier pada saat beroperasi mendekati saturasi, persyaratan linieritas sering menjadi batasan pada kemampuan penghantaran daya yang terukur. Secara umum, ketika beroperasi mendekati saturasi, linieritas penguat menurun dengan cepat dikarenakan sinyal tambahan yang dikirim oleh penguat secara proporsional lebih kecil dari distorsi tambahan yang telah dihasilkan.

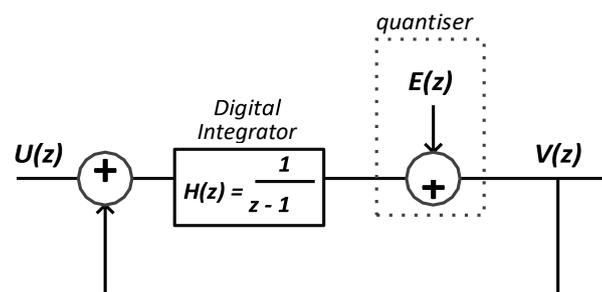
Dalam prediksi digital, penguat daya RF merupakan bagian dari pemancar RF. Di mana sinyal input digital diubah menjadi sinyal analog, lalu frekuensi dikonversikan ke atas untuk membuat sinyal RF, kemudian diperkuat oleh penguat daya RF. Predistorsi diterapkan pada sinyal ketika dalam format digital untuk mengkompensasi nonlinier di kemudian hari pada

r transmisi [18].



## II.4 Sigma-Delta ( $\Sigma\Delta$ ) Modulator

Modulasi  $\Sigma\Delta$  berfungsi sebagai *analog to digital converter*. Modulator  $\Sigma\Delta$  memiliki *dynamic range* yang besar, area chip yang kecil dan mengkonsumsi daya input yang rendah sehingga mudah diaplikasikan sebagai unsur komponen elektronik. Teknik  $\Sigma\Delta$  membentuk *noise shaping* untuk menjauhkan signal band dari noise dan *quantisation noise* untuk menekan noise tersebut serendah mungkin. Teknik modulasinya dengan cara mengurangi hasil sampling *quantisation error* dari sampling signal yang dihasilkan sebelumnya (*feedback*) dan seterusnya hingga *quantisation error* yang diperoleh menjadi nol. Error signal akan diperoleh setelah di link *feedback* sehingga teknik  $\Sigma\Delta$  berfungsi pula sebagai *filter* karena memisahkan *transfer function* antara signal dan noisenya [19].



Gambar II.3. Linear  $z$ -domain pada  $\Sigma\Delta$  modulator (MOD1) [16].

Gambar II.3 memperlihatkan struktur analog dasar sebuah ADC dengan filter (*integrator*) dan linear  $z$ -domainnya. Modulator  $\Sigma\Delta$  dapat dinormalisasikan secara linear untuk memudahkan dalam analisis

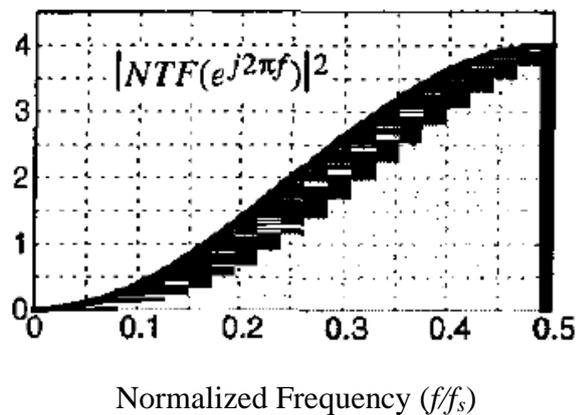
matematika, dimana kuantiser dapat diasumsikan sebagai non-korelasi *white noise*,  $E(z)$ , dan keluarannya berupa hasil penjumlahan kuantisasi noise tersebut dengan signal input terbentuk dari *noise transfer function* (NTF) dengan signal input terbentuk



dari *signal transfer function* (STF) [15]. Dimana NTF dan STF dapat diperoleh dengan persamaan berikut :

$$\text{NTF} = [2 \sin (\pi f)]^2, \text{ dan } \text{STF} = 1 - \text{NTF} \quad (1)$$

Filter digital  $H(z)$  diperoleh dari sebuah integrator dengan transfer function  $\frac{1}{z-1}$  dan beroperasi sebagai *noise shaping filter* pada  $E(z)$  dan juga sebagai *signal shaping filter* pada  $U(z)$ .



Gambar II.4. Noise-Shaping Function untuk  $\Sigma\Delta$  modulator [20].

## II.5 Arsitektur Transmitter $\Sigma\Delta$ Upconverters

### II.5.1. Bandpass $\Sigma\Delta$ Upconverters

Teknik modulasi *band-pass*  $\Sigma\Delta$  merupakan struktur permulaan bagi desain pemancar RF menggunakan SMPA. Keyzer [21] dalam penelitiannya bahwa modulator *band-pass*  $\Sigma\Delta$  mampu menghasilkan sebuah deretan signal pulsa dan mampu menekan *quantisation noise* sehingga sangat cocok sebagai

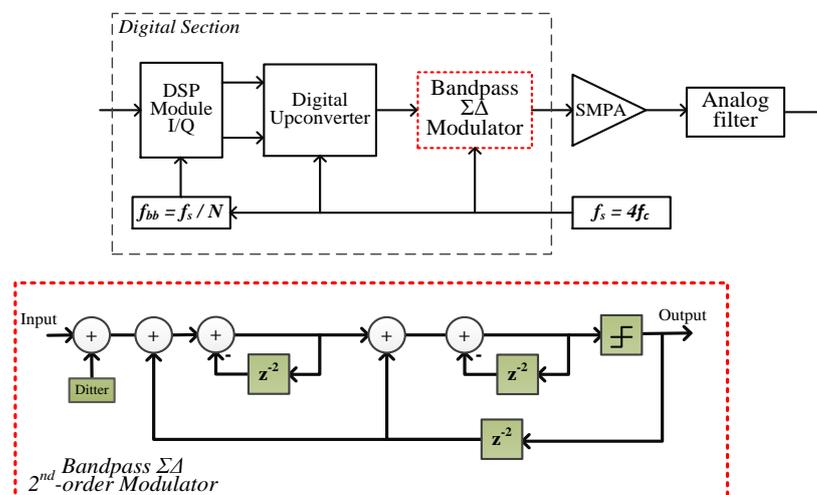
masuk ke penguat-penguat SMPA (Gambar II.5).

Teknik modulasi ini dapat menghilangkan prosesi analog melalui DSP



yaitu dengan cara mengganti *band-pass*  $\Sigma\Delta$  1-bit ADC dengan *band-pass*  $\Sigma\Delta$  1-bit DAC. Modul DSP digunakan untuk menghasilkan input signal baseband *I-Q*. Setelah itu, kedua input tersebut akan diinterpolasi dengan *sampling frequency* ( $f_s$ ) yang cukup besar sebelum dilakukan konversi sinyal. Metode konversi dilakukan dengan cara masing-masing signal baseband *I-Q* dikalikan dengan deret pulsa 1,1,-1,-1,... (untuk baseband-*I*) and -1,1,1,-1,... (untuk baseband-*Q*). Hasil proses konversi kemudian digabungkan dan diteruskan ke modulator *band-pass*  $\Sigma\Delta$  dimana akan menghasilkan sederetan sinyal digital *waveform* untuk kemudian diteruskan ke SMPA. Teknik modulasi ini memerlukan  $f_s$  yang empat kali lebih besar dari *carrier frequency* ( $f_c$ ) RF.

Dengan tingginya kecepatan waktu (*clock rate*) tersebut maka memerlukan konsumsi daya yang besar sehingga bisa mengurangi efisiensi sistemnya.

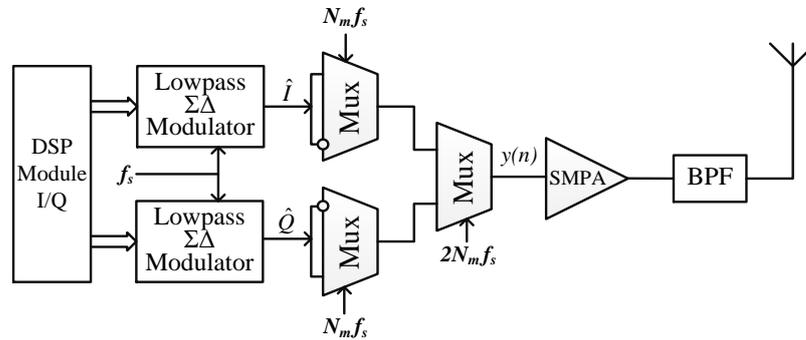


Gambar II.5. Band-pass  $\Sigma\Delta$  upconverter (MOD2) [21].

Implementasi lain pada teknik *band-pass*  $\Sigma\Delta$  yaitu menggunakan



kombinasi dua modulator *low-pass*  $\Sigma\Delta$  untuk baseband-*I* dan baseband-*Q* telah diteliti oleh [9].



Gambar II.6. Band-pass  $\Sigma\Delta$  upconverters dengan dua low-pass  $\Sigma\Delta$  [9].

Pada Gambar II.6, *upconverter* ini dilengkapi dengan tiga buah unit *multiplexer* (Mux) yang beroperasi seperti *quadrature modulator* untuk mengkonversi bit kuantisasi  $\hat{I}$ - $\hat{Q}$  ke bentuk sinyal RF melalui  $f_c$ . Hal ini dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$y_{RF}(n) = \hat{Q} \sin\left(2\pi n \frac{f_c}{f_{clock}}\right) + \hat{I} \cos\left(2\pi n \frac{f_c}{f_{clock}}\right) \quad (2)$$

Pada saat  $f_{clock} = 4f_c$  maka persamaan (1) menjadi:

$$\sin\left(2\pi n \frac{f_c}{f_{clock}}\right) = 0,1,0,-1,0,1, \dots \quad (3)$$

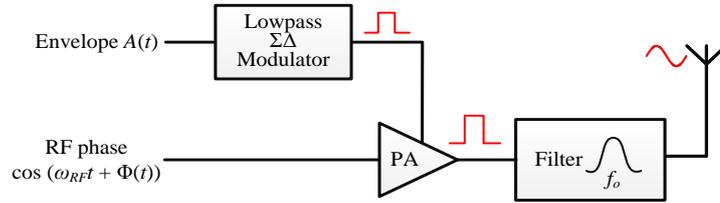
$$\cos\left(2\pi n \frac{f_c}{f_{clock}}\right) = 1,0,-1,0,1,0 \dots \quad (4)$$

## II.5.2. Polar $\Sigma\Delta$ Upconverters

Teknik polar  $\Sigma\Delta$  beroperasi pada sinyal berskema polar (amplituda  $A(t)$  fasa  $\Phi(t)$ ) dan bukan skema *I-Q* [11]. Struktur polar  $\Sigma\Delta$  ini telah diperkenalkan untuk mengurangi aktivitas switching dan mengurangi

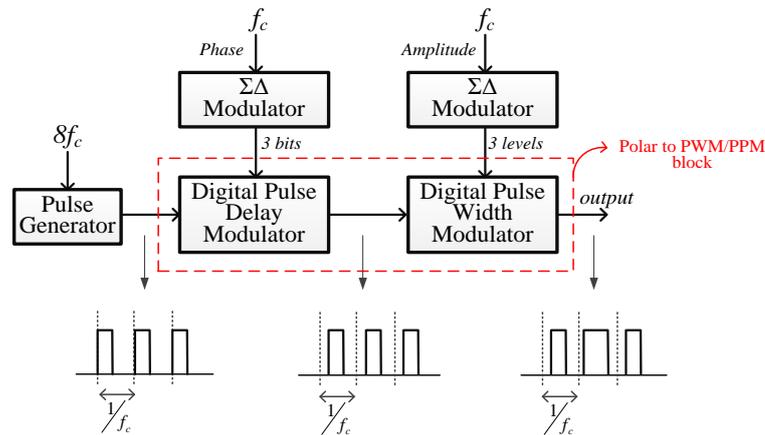


penggunaan komponen analog.



Gambar II.7. Polar  $\Sigma\Delta$  upconverters berbasis burst-mode [11].

Gambar II.7 adalah struktur polar  $\Sigma\Delta$  yang terdiri atas modulator *low-pass*  $\Sigma\Delta$  1-bit dan sebuah gerbang penguat. Setiap sampel (*envelope*) amplituda sinyal input  $A(t)$  akan mewakili nilai rata-rata periode ‘on’-‘off’ (*burst mode*) berbentuk signal pulsa dan inilah sebagai bagian output modulator *low-pass*  $\Sigma\Delta$ . Sedangkan fasa input akan mewakili pewaktuan pada pembawa RF. Gerbang penguat beroperasi dalam mode saturasi dengan input berupa gelombang segiempat (pulsa).



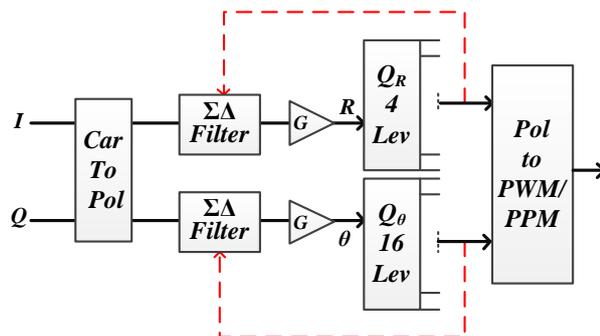
Gambar II.8. Polar  $\Sigma\Delta$  upconverters [22]

Keyzer [22] melakukan penelitian dengan mengembangkan struktur  $\Sigma\Delta$  melalui dua modulator  $\Sigma\Delta$ , dimana masing-masing modulator menghasilkan dua signal yang mengandung nilai amplitude dan fasa signal. Struktur  $\Sigma\Delta$



juga dirancang dengan menambahkan blok konversi *pulse width modulation* (PWM) dan *pulse position modulation* (PPM), terlihat pada Gambar II.8.

Amplituda signal dikuantisasi kedalam tiga level dan fasa signal dikuantisasi kedalam delapan level. *Digital pulse delay modulator* berperan pada input pemodulasi fasa dalam periode  $f_c$  dan *digital pulse delay modulator* berperan menghasilkan ouput termodulasi fasa dalam periode  $\frac{1}{8f_c}$ . Proses selanjutnya adalah *pulse expander* untuk mengubah-ubah lebar fasa. Struktur ini mampu mengurangi jumlah pulsa dalam satu periode dan *switching pulse* disaat signal inputnya kecil. Struktur ini sangat baik diterapkan dalam transmitter-RF karena memiliki efisiensi yang sangat baik namun kelemahannya ialah terbentuknya lebar pulsa (bandwidth) yang sangat besar.



Gambar II.9. Polar  $\Sigma\Delta$  upconverters [10]

Bassoo [10] melakukan penelitian pengembangan pada struktur polar  $\Sigma\Delta$  seperti terlihat pada gambar II.9. Input signal berupa baseband  $I$ - $Q$  dikonversi kedalam format polar menghasilkan  $R$ ,  $\theta$ . Dua buah modulator *low-*  
 $\Sigma\Delta$  ditempatkan untuk masing-masing signal  $R$  (amplituda) dan  $\theta$  (fasa).

nilai  $R$  dikuantisasi dalam 4 level dan  $\theta$  dikuantisasi dalam 16 level distribusi antara nilai 0 hingga  $2\pi$ . Luaran hasil kuantisasi akan dijadikan



unit loop (*feedback*) kembali ke filter  $\Sigma\Delta$  dan sekaligus juga diteruskan ke blok ‘Polar to PWM/PPM’ untuk menghasilkan pulsa *waveform*. Hasil inilah kemudian akan menjadi input (*driver*) bagi SMPA.

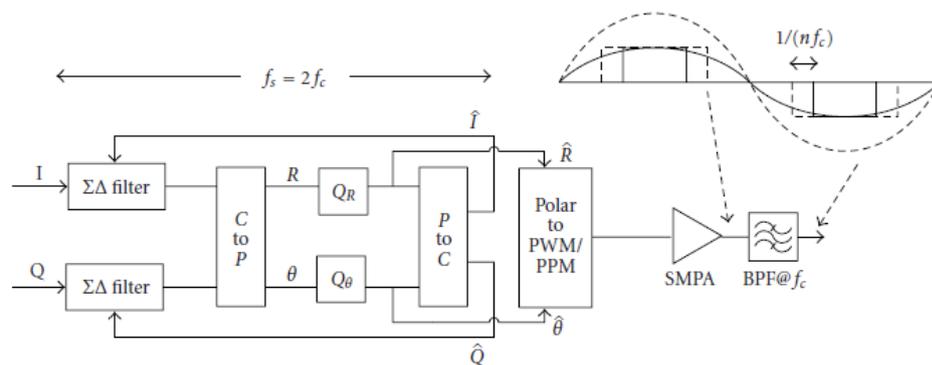
Dari hasil studi pustaka diatas dan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa struktur  $\Sigma\Delta$  dapat menghasilkan akurasi lebar dan posisi pulsa pada setiap cycle di *carrier frequency*. Dengan demikian dalam struktur  $\Sigma\Delta$  signal fasa harus dimodifikasi untuk mengurangi pergeseran fasa. Selain itu, struktur polar  $\Sigma\Delta$  memiliki bandwidth besar dibandingkan dengan struktur *I-Q* sehingga proses ini bisa mengurangi modulasi lebar pita yang diinginkan. Walaupun demikian, struktur ini tetap unggul dalam mengurangi kecepatan cuplik. Kekurangan struktur polar  $\Sigma\Delta$  terdapat pada *quantisation noise* dan *noise floor* yang tinggi yang menyebabkan munculnya banyak komponen spectral yang tak diinginkan bahkan menjadi gangguan bagi signal utama. Kuantisasi level pada struktur-struktur diatas umumnya masih bergantung pada periode clock umum. Peningkatan kinerja dengan meneliti model kuantisasi per periode clock dengan mempertimbangkan perubahan OSR diharapkan akan lebih akurat sehingga dapat berpengaruh dalam membentuk lebar dan posisi signal RF yang lebih efisien.

## II.6 Cartesian $\Sigma\Delta$ Upconverters

Gambar II.10 menunjukkan diagram blok dari arsitektur yang dihasilkan yang disebut sebagai Cartesian. Ini dapat menghasilkan rangkaian sa PWM/PPM dengan informasi fase dan amplitudo yang sesuai,



sekaligus memiliki kompatibilitas penuh dengan desain sirkuit digital sinkron. Ini terdiri dari dua modulator delta sigma lowpass orde pertama (MOD 1), amplitudo dan kuantisasi fase, dan blok polar ke "PWM / PPM". Sinyal Cartesian melewati  $\Sigma\Delta$  filter, setelah itu diubah menjadi polar  $[R,\theta]$  untuk kuantisasi dalam blok QR dan  $Q\theta$ .



Gambar II.10 Blok diagram cartesian sigma delta [33].

Sinyal terkuantisasi  $[R,\theta]$  kemudian diubah kembali ke cartesian sebelum diumpankan kembali ke *filter*. Ini membentuk kebisingan kuantisasi menjauh dari pita sinyal. Struktur yang dilaporkan sebelumnya melakukan penyaringan pada sinyal polar, sementara pekerjaan ini memberikan kinerja yang unggul karena penyaringan pada sinyal cartesian di mana tidak ada ekspansi bandwidth. Dalam hal ini, amplitudo dikuantisasi menjadi  $(n/2+1)$  level yang sesuai dengan lebar pulsa  $(0, 2/n, 4/n, 6/n \dots (n/2)/n)(1/f_c)$  ( $f_c =$  frekuensi pembawa) dan fase dikuantisasi menjadi  $n$  fase bertahap dari nol hingga  $2\pi$ . Proses kuantisasi ini membutuhkan jam digital sistem untuk melakukan oversample  $f_c$  dengan faktor  $n$  ( $f_{clock} = n f_c$ ) [33].



## II.7 Distorsi Harmonik

Disebut distorsi harmonik jika output tidak sama dengan sinyal input. Semua produk distorsi akan mengurangi rentang dinamis dan akan mempersulit pemenuhan kebutuhan topeng spektrum dalam pita operasi [23]. Nonlinier pada amplifier RF, filter dan mixer, tentu menghasilkan komponen spektral yang tidak diinginkan seperti produk harmonisa dan juga intermodulasi (produk distorsi). Karena produk distorsi biasanya tidak diinginkan, maka produk tersebut harus dilemahkan atau bahkan dihilangkan. Linearisasi dengan umpan balik dapat dimungkinkan tetapi dengan batasan. Khususnya pada sirkuit frekuensi tinggi, jumlah gain loop yang tersedia dibatasi. Umpan balik dapat menimbulkan risiko ketidakstabilan [24].

Sejumlah produk distorsi atau sinyal palsu menjadi jelas pada spektrum keluaran dari blok 'kutub ke PWM / PPM'. Gambar mirrow dan harmonisa yang terjadi disebabkan oleh bentuk pulsa persegi panjang yang terlipat dalam pita dan kemudian menyebabkan gangguan pada saluran yang saling berdekatan dan serta sekitarnya [23].

## II.8 Modulasi Digital (PWM/PPM)

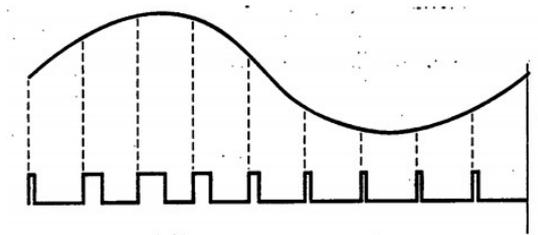
Dalam telekomunikasi modulasi berarti mengatur suatu parameter dari suatu sinyal pembawa yang berfrekuensi tinggi dengan bantuan sinyal informasi yang memiliki frekuensi lebih rendah. Gelombang pembawa akan selalu berbentuk sinusoidal [25]. Modulasi digital adalah proses superposisi sinyal digital yang merupakan deretan bit stream kedalam pembawa. Modulasi digital merupakan proses mengubah-ubah suatu



karakteristik dan sifat gelombang carrier sehingga menghasilkan bentuk modulasi yang memiliki bit 0 atau 1 yang disimpannya [26]. Pada modulasi pulsa, pembawa informasi berupa deretan pulsa-pulsa. Pembawa yang berupa pulsa-pulsa ini kemudian dimodulasi oleh sinyal informasi, sehingga parameternya berubah sesuai dengan besarnya amplitudo sinyal pemodulasi (sinyal informasi) [27].

### II.8.1 PWM (*Pulse Width Modulation*)

*Pulse Width Modulation* adalah cara memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu perioda, untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Pada modulasi PWM, lebar pulsa pembawa diubah-ubah sesuai dengan besarnya tegangan sinyal pemodulasi. Semakin besar tegangan sinyal pemodulasi (informasi) maka semakin lebar pula pulsa yang dihasilkan [27]. Ilustrasi sinyal PWM dapat dilihat pada Gambar II.10 berikut.



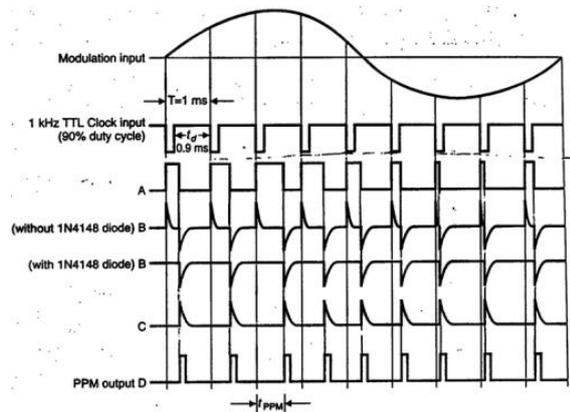
Gambar II.11 Sinyal PWM [27].

### II.8.2 PPM (*Pulse Position Modulation*)

Pulse Position Modulation merupakan bentuk modulasi pulsa yang mengubah-ubah posisi pulsa (dari posisi tak termodulasinya) sesuai dengan besarnya tegangan sinyal pemodulasi. Semakin besar tegangan sinyal pemodulasi (informasi) maka posisi pulsa PPM menjadi semakin jauh dari



posisi pulsa tak-termodulasinya [27]. Ilustrasi sinyal PPM dapat dilihat pada Gambar II.11 berikut.



Gambar II.12 Sinyal PPM [27].

## II.9 Fast Fourier Transform (FFT)

*Fast Fourier Transform* (FFT) adalah suatu metode yang sangat efisien untuk menghitung koefisien dari *fourier* diskrit ke suatu *finite* sekuen dari data yang kompleks. Karena substansi waktu yang tersimpan lebih dari pada metoda konvensional, *fast fourier transform* merupakan aplikasi temuan yang penting pada sejumlah bidang yang berbeda seperti analisis *spectrum*, *speech and optical signal processing*, *design filter digital*. Algoritma FFT berdasarkan prinsip pokok dekomposisi perhitungan *discrete fourier transform* dari suatu sekuen sepanjang N kedalam transformasi diskrit *fourier* secara berturut-turut yang lebih kecil. Prinsip ini diterapkan memimpin ke arah suatu variasi dari algoritma yang berbeda, di mana semuanya memperbandingkan peningkatan kecepatan perhitungan [28].



Karena banyak sinyal-sinyal dalam sistem komunikasi yang bersifat kontinyu, sehingga untuk kasus sinyal kontinyu kita gunakan transformasi

*fourier. Fast Fourier Transform (FFT)* dapat digunakan untuk menghitung nilai frekuensi, amplitudo dan fase dari suatu gelombang sinyal. Sementara untuk menghitung spektrum frekuensi sinyal pada komputer digital membutuhkan algoritma *Discrete Fourier Transform (DFT)*. *Discrete Fourier Transform (DFT)* mengubah sinyal domain waktu menjadi sinyal domain frekuensi [29].

Untuk persamaan FFT dan DFT dapat dituliskan sebagai berikut :

1. FFT [30] :

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (5)$$

2. DFT :

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \exp[-2j\pi ux/N] \quad (6)$$

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \left( \cos\left(\frac{2\pi ux}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi ux}{N}\right) \right) \quad (7)$$

Dimana N merupakan jumlah sampel yang diambil [29].

## II.10 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

*Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)* digunakan secara luas dalam sistem komunikasi kabel dan nirkabel broadband karena ini merupakan solusi efektif untuk interferensi antar simbol yang disebabkan oleh saluran dispersif. Ini menjadi sangat penting karena kecepatan data meningkat ke titik di mana, ketika skema modulasi serial konvensional seperti

modulasi amplitudo kuadratur (QAM) atau NRZ digunakan, sinyal yang diterima setiap saat akan bergantung pada beberapa simbol yang ditransmisikan. Dalam hal ini kompleksitas pemerataan dalam skema serial



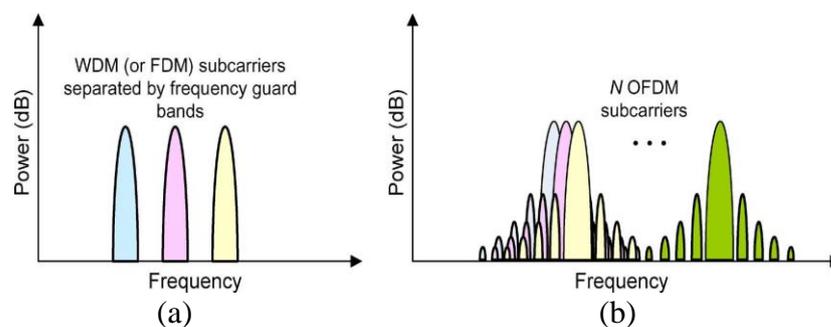
yang menggunakan pemerataan domain waktu meningkat pesat. Sebaliknya, kompleksitas OFDM, serta sistem yang menggunakan modulasi serial dan pemerataan domain frekuensi, skala serta kecepatan data dan peningkatan dispersi. Keuntungan utama kedua OFDM adalah mentransfer kompleksitas pemancar dan penerima dari domain analog ke digital. Misalnya, meski desain filter analog yang tepat dapat berdampak besar pada kinerja sistem modulasi serial, dalam OFDM setiap variasi fasa dengan frekuensi dapat dikoreksi dengan sedikit atau tanpa biaya di bagian digital receiver. Terlepas dari keuntungan penting OFDM ini, baru belakangan ini OFDM telah dipertimbangkan untuk komunikasi optik. Sementara terdapat banyak detail sistem OFDM yang sangat kompleks, konsep dasar OFDM cukup sederhana. Data ditransmisikan secara paralel pada sejumlah frekuensi yang berbeda, dan akibatnya periode simbol jauh lebih lama daripada sistem serial dengan kecepatan data total yang sama. Karena periode simbol lebih panjang, *intersymbol interference* (ISI) hanya mempengaruhi paling banyak satu simbol, dan pemerataan disederhanakan. Dalam sebagian besar implementasi OFDM, setiap ISI sisa dihilangkan dengan menggunakan bentuk interval penjaga yang disebut awalan siklik [30].

Ketika *frequency division multiplexing* (FDM) digunakan dalam sistem nirkabel konvensional, atau *wavelength division multiplexing* (WDM) digunakan dalam sistem optik, maka informasi juga ditransmisikan pada

jumlah frekuensi yang berbeda secara bersamaan. Namun terdapat  
jumlah perbedaan teoritis dan praktis utama antara OFDM dan sistem



konvensional ini. Dalam OFDM frekuensi *subcarrier* dipilih sehingga sinyal secara matematis ortogonal selama satu periode simbol OFDM. Baik modulasi dan *multiplexing* dicapai secara digital menggunakan *inverse fast Fourier transform* (IFFT) dan sebagai hasilnya, sinyal ortogonal yang dibutuhkan dapat dihasilkan secara tepat serta dengan cara komputasi yang sangat efisien. Dalam FDM / WDM ada pita pengaman frekuensi antara *subcarrier*. Di penerima, *subcarrier* individu dipulihkan dengan menggunakan teknik penyaringan analog. Gambar II.12 menunjukkan spektrum untuk FDM / WDM dan OFDM. Dalam OFDM, spektrum *subcarrier* individu tumpang tindih, tetapi karena sifat ortogonalitas, maka selama salurannya linier, *subcarrier* dapat didemodulasi tanpa gangguan dan tanpa perlu penyaringan analog untuk memisahkan *subcarrier* yang diterima. Demodulasi dan *demultiplexing* dilakukan dengan *fast fourier transform* (FFT). Spektrum *subcarrier* OFDM individu memiliki bentuk  $\sin(x)/x^2$ , sehingga setiap *subcarrier* OFDM memiliki *sidelobes* signifikan pada rentang frekuensi yang mencakup banyak subcarrier lainnya. Ini merupakan penyebab dari salah satu kelemahan utama OFDM, bahwa OFDM cukup sensitif terhadap offset frekuensi dan gangguan fasa [30].

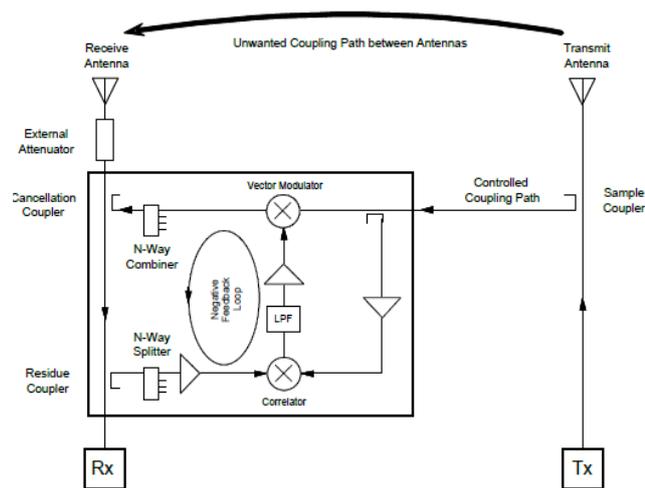


Gambar II.13 Spektrum (a) sinyal WDM atau FDM (b) sinyal, OFDM [30].



## II.11 Prinsip Pembatalan Interferensi RF (*RF Interference Cancellation*)

Prinsip pembatalan interferensi RF dapat dijelaskan dengan melihat pada diagram blok yang ditunjukkan pada Gambar II.13. Terlihat bahwa, antena dua radio ditempatkan bersama, satu di sisi kanan, beroperasi di 'transmisi' dan yang lainnya, di sisi kiri, beroperasi di 'menerima' [32].



Gambar II.14 Diagram Blok Sistem Dasar Sistem Pembatalan Interferensi RF [32]

Prinsip dasarnya yaitu untuk mengambil sampel sinyal yang mengganggu, dengan menggabungkan sebagian dari pengumpan transmisi, menyesuainya dalam amplitudo dan fase dan kemudian menyuntikkannya ke pengumpan penerima melalui penggandeng arah lain untuk memberikan replika anti-fase yang tepat untuk melakukan pembatalan sinyal yang digabungkan ke antena penerima. Proses ini dioptimalkan dengan memantau residu setelah pembatalan dan menggunakan sinyal ini untuk menggerakkan

pengumpan balik negatif untuk meminimalkan residu sehingga memaksimalkan pembatalan. Sirkuit yang mengontrol proses pembatalan



disebut 'modul bobot', karena menerapkan bobot yang benar pada amplitudo dan fase untuk melakukan pembatalan maksimum [32].

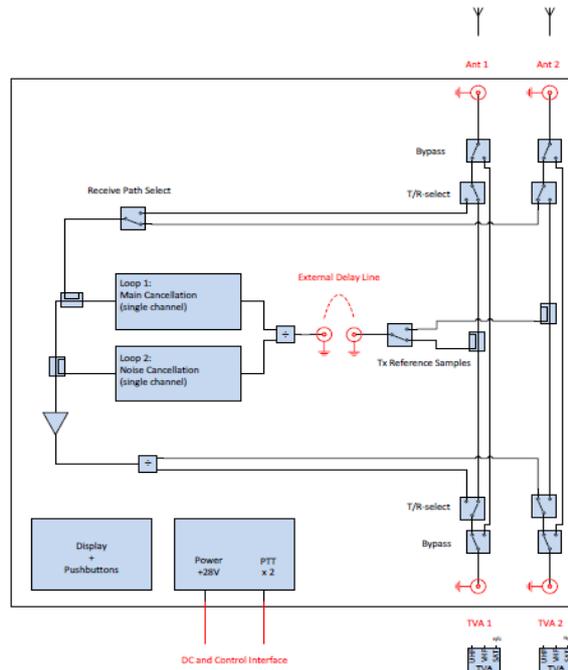
Umumnya, saat membatalkan sinyal interferensi yang terkait dengan satu saluran radio, mencocokkan waktu tunda antara sambungan antena dan jalur pembatalan tidak penting. Ini karena bandwidth penerimaan radio komunikasi yang beroperasi di AM atau FM sempit, biasanya 25kHz. Namun, pencocokan waktu tunda penting untuk kasus pembatalan yang sangat broadband, seperti yang diperlukan untuk menghilangkan interferensi dari radio data berkapasitas tinggi, tautan video, dan peralatan ECM, di mana persyaratan bandwidth pembatalan seketika umumnya akan jauh lebih besar, misalnya beberapa MHz [32].

Pada Gambar II.14 menunjukkan diagram blok yang lebih rinci dari suatu sistem untuk menangani interferensi timbal balik antara dua radio. Diketahui bahwa saat kedua radio memancarkan atau saat keduanya menerima, tidak diperlukan pembatalan interferensi RF. Pembatalan hanya diperlukan ketika satu radio memancarkan dan satu menerima. Oleh karena itu, hanya satu set modul beban yang diperlukan dan diaktifkan dengan benar tergantung pada radio mana yang memancarkan dan mana yang menerima. Diagram blok ini berisi kombinasi modul beban yang membatalkan tidak hanya sinyal pancar yang besar, tetapi juga menempatkan null pada noise pita sisi pemancar yang diterima pada frekuensi saluran penerima yang diinginkan

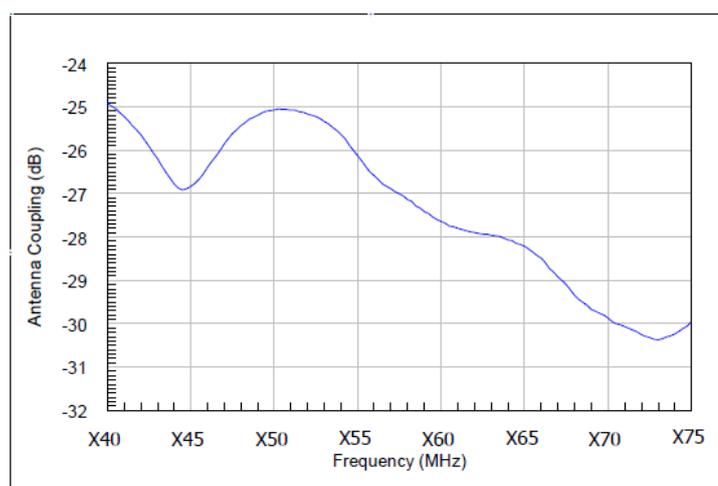
]. Gambar II.15 dan II.16 menunjukkan karakteristik kopling dan tundaan grup yang khas untuk dua antena pada platform seluler yang



representatif. Karakteristik ini diukur dengan menghubungkan penganalisis jaringan ke input masing-masing antenna dan mengukur  $S_{21}$  dari mana kopling (dB) dan penundaan grup (ns) diturunkan [32].

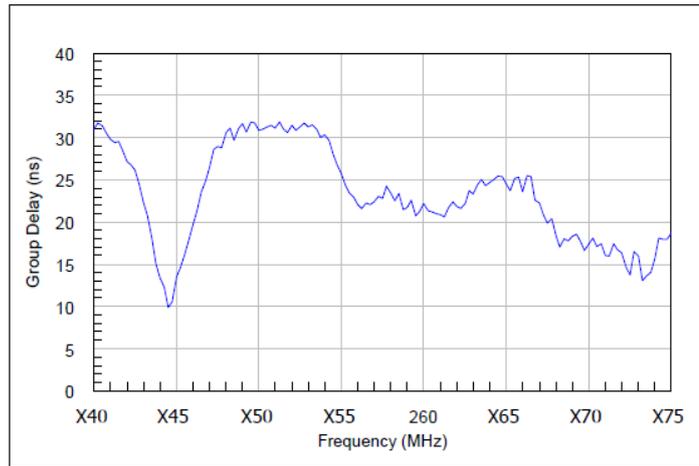


Gambar II.15 Implementasi Praktis dari Sistem Pembatalan Interferensi RF 2 Radio [32]



Gambar II.16 Tipikal Kopling Antena v Frekuensi [32]

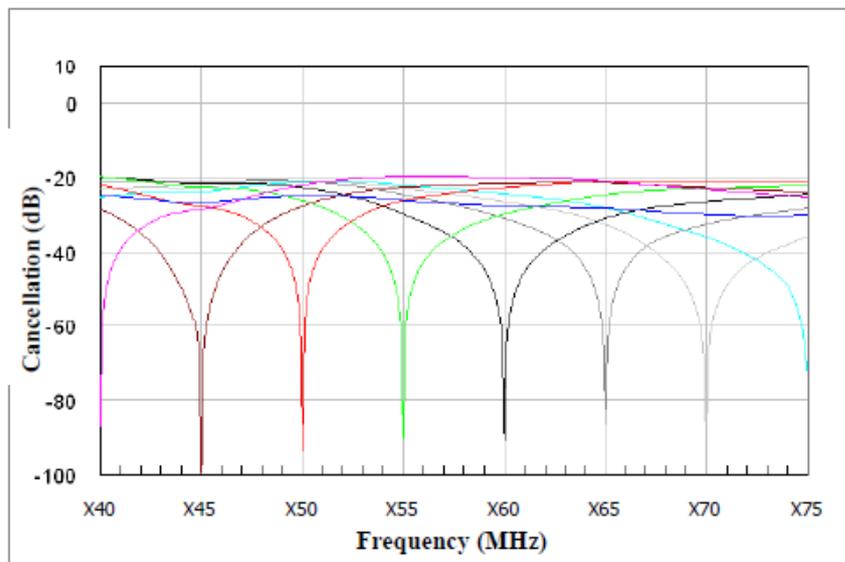




Gambar II.17 Tipikal Penundaan Grup v Frekuensi [32]

Karakteristik di atas, dengan puncak dan palung dalam kopling dan penundaan grup, disebabkan oleh sifat resonan Q yang rendah, struktur antenna digabungkan dengan sirkuit yang cocok.

Hasil dari Gambar II.15 dan II.16 diimplementasikan dalam sebuah model sistem pembatalan. Kurva pembatalan tipikal di plot pada Gambar II.17 sebagai frekuensi pembatalan melangkah melintasi pita.



Gambar II.18 Tipikal Pembatalan Karakteristik [32]

