

**ANALISIS KONVERGENSI DAN
EKSPERIMENT ACCUMULATOR-ASSISTED
DISTRIBUTED TURBO CODE
MENGGUNAKAN SOFTWARE DEFINED
RADIO**

LAPORAN TESIS

Oleh :
ARDIMAS ANDI PURWITA
23212008



PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
SEKOLAH TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
2014

**ANALISIS KONVERGENSI DAN
EKSPERIMENT ACCUMULATOR-ASSISTED
DISTRIBUTED TURBO CODE
MENGGUNAKAN SOFTWARE DEFINED
RADIO**

LAPORAN TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk
memperoleh gelar Magister
Program Studi Teknik Elektro
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung

Oleh :
ARDIMAS ANDI PURWITA
23212008



PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
SEKOLAH TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
2014

**ANALISIS KONVERGENSI DAN EKSPERIMENT
ACCUMULATOR-ASSISTED DISTRIBUTED TURBO CODE
MENGGUNAKAN SOFTWARE DEFINED RADIO**

Oleh :
ARDIMAS ANDI PURWITA
23212008

LAPORAN TESIS

telah diterima dan disahkan
untuk memperoleh gelar Magister Teknik
Program Studi Teknik Elektro
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung

Bandung, 25 Agustus 2014

Pembimbing

Trio Adiono, Ph.D.
NIP 197008241997021001

ABSTRAK

Laporan tesis ini menjelaskan analisis *accumulator-assisted distributed turbo code* (ACC-DTC) baik secara teoritis dengan menggunakan *extrinsic information transfer* (EXIT) chart dan evaluasi performa secara langsung di lapangan. Teknik ini sangat menarik karena pada umumnya error yang terjadi di intralink, link antara source dan relay, harus dihindari. Pada laporan ini, dilakukan analisis 2D dan 3D EXIT chart terhadap ACC-DTC. EXIT chart ini digunakan untuk analisis dari penyederhanaan perhitungan estimasi korelasi source dan relay. Selanjutnya, ACC-DTC ini dilihat performanya secara langsung di lapangan untuk melihat kecenderungan diversity ordernya. Diversity order ini diamati dari kurva BER dan FER sebagai fungsi dari *signal-to-noise ratio* (SNR). Sejauh yang diketahui, tidak banyak laporan mengenai hasil eksperimen teknik *error correction coding* (ECC) yang terdistribusi secara langsung di lapangan. Pengukuran dilakukan di indoor (di dalam rumah) dan di outdoor (di taman) di salah satu perumahan di Lumajang, Jawa Timur, Indonesia. Eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan *software defined radio* (SDR). Untuk implementasinya digunakan NI USRP-2920 dan LabVIEW. Hasil dari pengukurannya menunjukkan bahwa ACC-DTC memiliki kecenderungan diversity order yang kedua sebagaimana ditunjukkan pada hasil simulasi ACC-DTC. Sebagai pelengkap dari laporan ini, sebuah demo awal aplikasi ACC-DTC secara real-time menggunakan dua buah USRP juga ditampilkan untuk melihat peluangnya untuk dikembangkan kedepannya. Berdasarkan hasil ini, sangat disarankan bahwa ACC-DTC ini dapat dikembangkan menjadi sebuah aplikasi yang real-time.

Kata Kunci: Sistem relay, doped accumulator, iteratif dekoding, EXIT chart, space diversity, diversity order, SDR, USRP.

ABSTRACT

This report presents both a theoretical analysis using extrinsic information transfer (EXIT) chart and a real-world performance evaluation of the accumulator-assisted distributed turbo code (ACC-DTC). This technique is interesting since it is commonly believed that the error of intralink, the source-relay link, should be avoided. In this report, we provide analyses using 2D and 3D EXIT charts with respect to our original work. The EXIT chart analyses are used to further simplify source-relay correlation estimation technique. The further evaluation is performed using real-field performance evaluation of the ACC-DTC to verify the diversity order of the ACC-DTC, observed from the BER and FER curves as function of signal-to-noise ratio (SNR). To the best of our knowledge, there are very few reports about experimental evaluation of a distributed error correction code technique. The measurement took place both indoor (house type environment) and outdoor (garden type environment) in a suburban home in Lumajang, East Java, Indonesia by using software defined radio (SDR). We used LabVIEW and NI USRP-2920. The evaluation results show that the nearly second diversity order can be achieved as predicted by the ACC-DTC's simulation result. As complement of this report, a real-time demo application using only two USRPs was made to further develop the ACC-DTC into a real application. Based on this work, it is very encouraging to further develop the ACC-DTC into real applications.

Keywords: Relay system, doped accumulator, iterative decoding, EXIT chart, space diversity, diversity order, SDR, USRP.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil 'alamin. Segala puji bagi Allah, Tuhan semesta alam yang terpuji dalam seluruh perbuatan, sifat-sifat, dan nama-nama-Nya. Tidak akan putus pujian untuk-Mu atas nikmat memuji-Mu ini. Laa haula walaa quwwata illaa billaah (Tidak ada daya dan upaya, kekuatan kecuali dari Allah). Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan nikmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tesis dengan judul "**ANALISIS KONVERGENSI DAN EKSPERIMENT ACCUMULATOR-ASSISTED DISTRIBUTED TURBO CODE MENGGUNAKAN SOFTWARE DEFINED RADIO**".

Dalam penggeraan tesis ini, penulis tidak dapat terlepas dari bantuan banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- KELUARGA tercinta yang setia mendukung dan menjadi motivasi terbesar bagi penulis;
- TRIO ADIONO, PH.D sebagai pembimbing;
- PAK KHOIRUL sebagai pembimbing co-supervisor;
- PAK SARWONO, PAK YUDI, DAN PAK SIGIT sebagai penguji;
- Semua teman diskusi yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS

Tesis S2 yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Institut Teknologi Bandung, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada pengarang dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Institut Teknologi Bandung. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin pengarang dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh isi tesis haruslah seizin Direktur Program Pascasarjana Institut Teknologi Bandung.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS	iv
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR SINGKATAN	xi
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang dan Motivasi	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Metodologi Penelitian	6
1.6 Sistematika Penulisan	7

2 DASAR TEORI	9
2.1 Sistem Komunikasi Digital	9
2.2 Channel Coding	10
2.2.1 Channel Dekoder	11
2.2.2 <i>Log Likelihood Ratio</i>	11
2.2.3 Algoritma <i>Maximum A-Posteriori</i> (MAP)	11
2.2.4 Algoritma Max-log-MAP	13
2.3 <i>Accumulator-Assisted Distributed Turbo Codes</i> (ACC-DTC)	14
2.3.1 Pemodelan Sistem	15
2.3.2 Struktur Dekoder	16
2.3.3 Perbandingan Antara ACC-DTC dengan Strategi Konvensional <i>Decode-and-Forward</i>	18
2.4 <i>Extrinsic Information Transfer</i> (EXIT) Chart	19
2.4.1 <i>Entropy</i> dan <i>Mutual Information</i>	19
2.4.2 Analisis EXIT Chart	20
2.5 NI-USRP dan LabVIEW	22
3 ANALISIS KONVERGENSI ACC-DTC	25
3.1 Analisis EXIT Chart ACC-DTC	25
3.2 Penyederhanaan Perhitungan Korelasi Source-Relay	27
3.2.1 Konvergensi Square Error	30
3.2.2 Analisis Menggunakan 3D EXIT Chart	30

4 EKSPERIMENT ACC-DTC LANGSUNG DI LAPANGAN	34
4.1 Prosedur Eksperimen	34
4.2 Sistem Arsitektur	38
4.2.1 Pre-Processing : Periodogram	38
4.2.2 Main-Processing : Layer Fisikal	38
4.2.3 Post-Processing : Estimasi SNR	45
4.3 Hasil Eksperimen	45
4.4 Aplikasi ACC-DTC	47
5 KESIMPULAN	53
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Kontribusi	54
5.3 Publikasi	54
5.4 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	62

DAFTAR GAMBAR

2.1	Blok diagram model sistem komunikasi digital.	9
2.2	Blok diagram enkoder SCC dan PCC.	10
2.3	Diagram algoritma MAP.	13
2.4	Jenis soft informasi dan hubungan diantaranya.	13
2.5	Pemodelan sistem dengan konfigurasi lokasi relay yang berbeda.	15
2.6	Blok diagram <i>Accumulator-Assisted Distributed Turbo Codes</i> (ACC-DTC)	17
2.7	Struktur Enkoder ACC-DTC.	18
2.8	Perbandingan performa FER ACC-DTC dengan menggunakan strategi kooperatif EF dan DF.	19
2.9	Blok diagram enkoder, model kanal AWGN, dan iteratif dekoder untuk SCC.	21
2.10	Blok Diagram NI USRP-2920 [55].	23
3.1	EXIT chart untuk HI_S atau HI_R	26
3.2	Model bit-flipping.	27
3.3	3D EXIT chart dengan menggunakan model bit-flipping.	28
3.4	3D EXIT chart untuk model lokasi-A dan lokasi-B	29
3.5	Konvergensi square error $ Pe - \hat{p}_e ^2$ untuk semua iterasi dengan menggunakan model bit-flipping.	31
3.6	3D EXIT chart trajektori dekoding untuk melihat efek dari penyederhanaan perhitungan estimasi korelasi S-R terhadap performa secara keseluruhan.	32

3.7	BER dan FER performa ACC-DTC dengan menggunakan penyederhanaan perhitungan estimasi korelasi S-R terhadap performa secara keseluruhan.	33
4.1	Konfigurasi pengukuran di outdoor.	35
4.2	Konfigurasi pengukuran di indoor.	36
4.3	Foto pada saat pengukuran di outdoor.	37
4.4	Pengujian kecacatan AFE dengan sinyal single-tone.	39
4.5	Pengukuran dengan 1 kHz single tone dan frequency center $f_c = 433.92$ MHz dengan 1 MHz span.	40
4.6	Tampilan control panel LabVIEW untuk pengukuran dengan 1 kHz single tone dan frequency center $f_c = 433.92$ MHz.	40
4.7	Model komunikasi layer fisikal.	41
4.8	Blok diagram mode transmit-receive-store.	42
4.9	Ilustrasi prosedur pengukuran diversity order ACC-DTC dengan menggunakan dua buah USRP.	42
4.10	Sample diagram konstalasi dengan pengukuran langsung di lapangan.	43
4.11	Sample baseband PSD sinyal yang dikirim dan diterima.	44
4.12	Performa BER dan FER ACC-DTC pengukuran langsung di lapangan.	46
4.13	Control panel LabVIEW untuk top modul transmitter.	50
4.14	Control panel LabVIEW untuk top modul receiver.	51
4.15	Sample front panel LabVIEW untuk transmitter dan receiver.	52

DAFTAR TABEL

2.1 Tabel spesifikasi NI USRP-2920	24
--	----

DAFTAR SINGKATAN

ACC-DTC	<i>Accumulator-Assisted Distributed Turbo Code</i>
AFE	<i>Analog Front End</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BCJR	<i>Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CC	<i>Convolutional Code</i>
CEO	<i>Chied Executive Officer</i>
DF	<i>Decode and Forward</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
DTC	<i>Distributed Turbo Code</i>
ECC	<i>Error Correcting Code</i>
EF	<i>Extract and Forward</i>
EXIT	<i>Extrinsic Information Transfer</i>
FER	<i>Frame Error Rate</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HD	<i>Hard Decision</i>
HI	<i>Horizontal Iterations</i>
I/Q	<i>In-phase/Quadrature</i>

JSCN	<i>Joint Source Channel Network</i>
LLR	<i>Log-Likelihood Ratio</i>
LMS	<i>Least Mean-Squared</i>
LOS	<i>Line-of-Sight</i>
MAP	<i>Maximum A-Posteriori</i>
MARC	<i>Multiple-Access-Relay-Channel</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MM	<i>Method of Moments</i>
NI	National Instrument
NSNRCC	<i>Non-Systematic Non-Recursive Convolutional Codes</i>
P2P	<i>Point-to-Point</i>
PCC	<i>Parallel Concatenated Code</i>
pdf	<i>probability density function</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
pmf	<i>probability mass function</i>
POSTEL	Direktorat Jenderal Pos dan Telekomunikasi
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
SCC	<i>Serial Concatenated Code</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SISO	<i>Soft-Input Soft-Output</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SuTC	<i>Super Turbo Code</i>
USRP	<i>Universal Software Radio Platform</i>

VI	<i>Vertical Iterations</i>
WARP	<i>Wireless Open-Access Research Platform</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Motivasi

Sistem komunikasi kooperatif berkembang karena beberapa sebab, yaitu *bandwidth*, ukuran devais, dan keterbatasan energi dari sistem *multiple-input multiple-output* (MIMO) untuk meningkatkan kecepatan pengiriman data [1]. Tujuan utama dari sistem kooperatif ini adalah untuk mengatasi efek fading dengan cara menggabungkan dua atau lebih sinyal yang berbeda jalur propagasinya. Teknik ini dikenal dengan *diversity combining* [2]. Terdapat dua cara untuk memperoleh sifat kooperatif di dalam sebuah jaringan nirkabel: (1) menggunakan tambahan relay (*relay networks*), (2) memanfaatkan kerjasama antar relay (*cooperative networks*). Jenis diversity ini dikenal sebagai *space diversity*.

Salah satu ukuran kuantitatif dari diversity adalah *diversity order*. Diversity order di-definiskan sebagai perubahan kemiringan dari peluang error sebagai fungsi dari *signal-to-noise ratio* (SNR). Kuantitas lain adalah koefisien cross-correlation antara beberapa sinyal yang diterima untuk mengukur sifat independen dan derajat seberapa besar efek fading berkurang [3]. Pada tesis ini, hanya fokus pada kuantitas diversity order.

Accumulator-assisted distributed turbo code (ACC-DTC) [4] merupakan salah satu teknik dekoding untuk mencapai space diversity dengan cara memanfaatkan korelasi antara source (S)-relay (R) di destination (D) node. Pemanfaatan korelasi antara source-relay bertujuan untuk meningkatkan performa keseluruhan melalui *vertical iterations* (VI) diantara dua *horizontal iterations* (HI). Masing-masing HI berkaitan dengan source node atau relay node. Salah satu kelebihan dari ACC-DTC adalah data akan tetap dikirim meskipun data hasil dekoding terdapat kesalahan pada relay node. Jenis skema ini dikenal dengan nama strategi *extract-and-forward* (EF). Strategi EF ini berbeda dengan strategi yang konvensional, yaitu *decode-and-forward* (DF) [5]. Pada strategi DF, data tidak akan dikirim jika terdapat error di data hasil dekode. Relay pada ACC-DTC hanya mengekstrak informasi dari sinyal yang diterima, di-encode ulang, dan mengirimkan ke destination node. Secara perbandingan performa dengan teknik yang sudah ada, ACC-DTC memiliki performa yang lebih baik dari se-

gi bit-error-rate (BER) dan frame-error-rate (FER) dibandingkan dengan konvensional Distributed Turbo Code (DTC) [6] dan Super Turbo Code (SuTC) [7]. Selain itu, dari segi kompleksitas, ACC-DTC memiliki kompleksitas yang lebih sederhana dengan hanya menggunakan memory-one convolutional code (CC).

ACC-DTC telah banyak diadopsi untuk dikembangkan lebih jauh, misalnya Joint-Source-Chanel-Network (JSCN) koding dan modifikasinya [8, 9, 10, 11]; iterative demapping [12, 13] dan kombinasinya dengan sistem *automatic-repeat-request* (ARQ) [14, 15]; analisis peluang outage [16, 17, 18] dan implementasinya di orthogonal *multiple-access-relay-channel* (MARC) [19]; aplikasinya di *wireless sensor network* (WSN) dan *wireless mesh network* (WMN) dengan menggunakan *chief executive officer* (CEO) problem viewpoint [20, 21, 22]; dan simulasi menggunakan channel sounding field measurement data [23].

ACC-DTC ini merupakan jenis coding yang iteratif. Pada tahun 2001, Stephen ten Brink mengajukan sebuah tool yang sangat bermanfaat yang digunakan untuk memahami sifat konvergensi dari teknik dekoding yang iteratif. Tool ini diberi nama *extrinsic information transfer* (EXIT) chart [24]. Pertukaran informasi ekstrinsik antar dekoder dapat divisualisasikan dengan trajektori dekoding. Perilaku trajektori dekoding ini akan memantul di dalam sebuah tunnel EXIT chart. Jika tunnel antara kurva EXIT chart dan trajektori dekoding mencapai nilai mutual informasi (1,1) maka transmisi dengan hampir tidak ada error dapat diraih pula. Pada tesis ini akan diberikan analisis menggunakan 2D EXIT chart untuk HI dan 3D EXIT chart untuk VI dan sekaligus terhadap kinerja ACC-DTC keseluruhan. Dengan menggunakan EXIT chart ini, daerah turbo-cliff pada simulasi BER untuk kanal *additive white gaussian noise* (AWGN) dapat secara akurat diprediksi. Tingkat akurasi prediksi daerah turbo-cliff ini dapat dibandingkan dengan performa BER ACC-DTC di [4]. Selain itu, pada tesis ini, akan dibandingkan hasil simulasi ACC-DTC yang menggunakan strategi EF dan dengan ACC-DTC yang menggunakan strategi DF untuk melihat pengaruh peletakan relay pada ACC-DTC.

Berkaitan dengan korelasi antara source-relay pada ACC-DTC, tidak banyak alternatif yang telah dilakukan kecuali di [20]. Namun, tetap menggunakan perhitungan yang rumit. Selain itu, perhitungan ini juga membutuhkan sebuah nilai threshold T . Perhitungan korelasi source-relay ACC-DTC aslinya terinspirasi dari [7]. Kemudian, Daneshgara dkk. [25] menemukan sebuah pendekatan sederhana dengan menggunakan pendekatan empiris. Analisis kestabilan juga disampaikan di [25]. Mereka menyatakan bahwa dengan menggunakan panjang vektor biner $L > 1200$, dekoder iteratif mereka

tidak konvergen. Terinspirasi dari metode tsb., kami mengadaptasi pendekatan tsb. ke ACC-DTC struktur. Hasil simulai yang didapat dari aproksimasi tsb. menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan. Sifat konvergensi dianalisis menggunakan kriteria square error dan trajektori dekoding pada EXIT chart. Dari segi konvergensi ini ditunjukkan bahwa untuk panjang vektor biner $L = 10000$, estimasi ini yang diterapkan ke struktur dekoding ACC-DTC masih tetap konvergen.

Dibandingkan dengan penelitian dari segi teori (lihat [1, 5] dan referensi di dalamnya), tidak banyak evaluasi hasil eksperimen langsung di lapangan untuk jenis komunikasi kooperatif ini. Evaluasi performa secara langsung (bukan simulasi) sangat jarang dilakukan karena biaya, kompleksitas yang tinggi, dan lama pengerajam. Jenis evaluasi ini sangat krusial karena secara tidak sengaja dapat ditemukan kejadian-kejadian yang tidak diprediksi sebelumnya, kecacatan perancangan, perusakan asli yang terjadi di kanal (bukan hasil dari pemodelan), dan penurunan performa akibat terlalu sensitif terhadap parameter perancangannya (*performance-susceptible parameter*) [26]. Di [27], mereka memverifikasi total *packet-error-rate* (PER) dari sistem kooperatif multi-hop yang menggunakan strategi DF dan sebuah emulator fading. Analisis lebih komprehensif tentang eksperimen sistem komunikasi kooperatif ini dapat ditemukan di [28, 29]. Pada referensi tsb dijelaskan bahwa platform open source yang diberi nama wireless open-access research platform (WARP) dikembangkan. Tetapi, WARP tsb. belum terdapat *error-correcting-code* (ECC) enkoder di dalamnya. Dari yang telah disebutkan di atas, mereka tidak mencoba eksperimen di kanal yang asli. Di referensi lain [30, 31], mereka mencoba melakukan eksperimen di laboratorium mereka. Sejauh yang diketahui, tidak banyak laporan mengenai secara evaluasi secara eksperimen langsung dari teknik ECC yang terdistribusi di lingkungan indoor dan outdoor. Oleh karena itu, pada tesis ini akan dilaporkan hasil evaluasi diversity order ACC-DTC dengan eksperimen secara langsung di indoor (di dalam rumah) dan di outdoor (taman terbuka).

Software defined radio (SDR) memiliki keunggulan, diantaranya adalah dapat melakukan optimasi di berbagai layer komunikasi, dapat membuat aplikasi secara cepat, dan konfigurasinya dapat diubah-ubah [32]. Oleh karena itu SDR merupakan platform yang ideal untuk melakukan eksperimen komunikasi nirkabel. Platform SDR yang paling banyak digunakan adalah *universal software radio platform* (USRP). Pada pekerjaan tesis ini, kami menggunakan LabVIEW [33], NI USRP-2920 [34] dan antena dual-band 144/430 MHz dengan 2.15 dBi [35]. Kami melakukan eksperimen di salah satu rumah di Lumajang, Jawa Timur, Indonesia. Performan BER dan FER akan

diukur secara offline untuk menghindari perancangan algoritma *digital signal processing* (DSP) secara real-time, seperti yang dilakukan di [36]. Oleh karena itu, dapat digunakan dua buah USRP saja. Tidak seperti di [30], penggunaan dua USRP memiliki kelebihan karena dapat menyederhanakan masalah sinkronisasi pengiriman antara source node dan relay node. Seperti yang diungkapkan Murphy pada disertasinya di [28], masalah sinkronisasi ini merupakan masalah paling sulit dalam mengembangkan aplikasi komunikasi kooperatif.

Langkah awal yang harus dilakukan adalah memeriksa apakah ada interferensi dari sumber lain di spektrum 430 – 440 MHz. Kami menggunakan teknik sensing spektrum sederhana berbasiskan deteksi energi (periodogram) dengan alasan komputasi dan kompleksitasnya yang sederhana [37]. Dalam proses implementasinya dapat menggunakan sebuah *fast fourier transform* (FFT) dan *power spectral density* (PSD). Dengan metode sensing yang sama, kami juga melakukan observasi secara sekilas kecacatan dari *analog front end* (AFE), khususnya In-phase/Quadrature (I/Q) imbalance dan DC offset, dengan menggunakan transmisi single-tone. Tetapi, pengujian kecacatan AFE ini bukan fokus pada pengerjaan tesis kali ini karena pada dasarnya sistem yang dibuat pada tesis ini menggunakan modulasi *binary-phase-shift-keying* (BPSK) yang mana sinyal konstalasi BPSK ini tidak terlalu sulit untuk dibedakan. Teknik untuk mengurangi efek dari kecacatan AFE ini disebut dengan *dirty radio frequency* (RF). Ringkasan tentang dirty RF untuk SDR dapat dibaca di [38]. Sedangkan penelitian tentang fenomena I/Q imbalance untuk USRP dapat dipelajari di [39].

Posisi ACC-DTC pada layer fisikal sebuah sistem komunikasi berada di bagian outer receiver [40]. Di outer receiver selain terdapat ECC, terdapat juga source encoder. Sedangkan di inner receiver, yang posisinya berada sebelum outer receiver, berisi synchronizer dan channel equalizer. Dalam proses perancangannya kami menggunakan add-ons yang sudah tersedia dari LabVIEW. Namun, permasalahan utamanya adalah ACC-DTC membutuhkan soft-input sebagai masukannya. Oleh karena itu, kami menyambungkan modul hard-output equalizer dengan soft decision device. Dengan menggunakan add-ons yang sudah tersedia ini, proses desain yang dilakukan dijaga agar secepat dan sesederhana mungkin.

Karena untuk mengukur diversity order dibutuhkan pengukuran SNR juga, maka dibutuhkan perhitungan estimasi SNR pada tesis ini. Seperti yang disebutkan di referensi [31], mengestimasi SNR pada kanal fading tidak membantu dalam realisasi sebuah perancangan sistem komunikasi karena di kanal fading besar power sinyal yang diterima berubah secara acak. Oleh karena itu, di tesis ini akan menggunakan nilai rata-rata

sebagai solusinya. Beragam teknik telah banyak dikembangkan untuk mengestimasi SNR [41, 42]. Pada tesis ini, kami akan menggunakan estimator method of moments (MM) karena dalam realisasinya termasuk yang sederhana dibanding metode yang lain.

Untuk meningkatkan nilai tambah pada penelitian kali ini, maka akan ditambahkan demo sederhana aplikasi "real-time".¹ Tetapi, sama halnya dengan kasus pengukuran diversity order sebelumnya, masalah sinkronisasi transmisi juga masih disederhanakan pada pengembangan aplikasi ACC-DTC ini. Oleh karena itu, dalam perancangan aplikasi dapat menggunakan dua buah USRP. Perbedaan utama dari desain untuk pengukuran adalah ditambahkannya modul energi detektor di awal inner receiver untuk mengeliminasi sinyal bukan paket. Selain itu ACC-DTC juga disederhanakan kompleksitas perhitungan ACC-DTC.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang dan masalah yang telah dijelaskan, rumusan masalah dari tesis ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah teknik ACC-DTC konvergen dari segi trajektori dekodingnya?
2. Apakah hasil adaptasi penyederhanaan perhitungan estimasi korelasi S-R konvergen dari segi square error dan trajektori dekoding dan seberapa besarkah gain codingnya dibandingkan dengan ACC-DTC tanpa menggunakan penyederhanaan?
3. Apakah ACC-DTC mencapai diversity order kedua seperti yang telah ditunjukkan pada hasil simulasi di referensi aslinya [4]?
4. Apakah memungkinkan untuk mengembangkan ACC-DTC menjadi aplikasi yang real-time dengan beberapa batasan kondisi?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan pelaksanaan tesis ini adalah:

1. Analisis konvergensi ACC-DTC menggunakan EXIT chart.

¹Tidak diukur secara kuantitatif.

2. Adaptasi penyederhanaan perhitungan estimasi korelasi S-R dari metode yang sebelumnya dikembangkan oleh Daneshgara [25], analisis konvergensi dari segi square error dan trajektori dekoding, dan perbandingan BER dan FER dengan referensi asli ACC-DTC [4].
3. Evaluasi diversity order ACC-DTC dengan eksperimen secara langsung menggunakan USRP.
4. Implementasi aplikasi ACC-DTC secara real time dengan menggunakan dua buah USRP.

1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Teknik modulasi yang digunakan pada penelitian ini terbatas pada modulasi BPSK, baik untuk simulasi maupun implementasi di USRP.
2. Model kanal yang digunakan untuk simulasi BER adalah kanal AWGN, sedangkan model kanal yang digunakan untuk simulasi FER adalah kanal frequency-flat block-Rayleigh fading.
3. Untuk mendapatkan BER dan FER digunakan metode monte-carlo baik simulasi dan pengukuran langsung menggunakan USRP.
4. Pemilihan teknik-teknik yang digunakan selain ACC-DTC dipilih dengan alasan kemudahan implementasi.
5. Karena pengembangan ACC-DTC ke tahap aplikasi masih merupakan pekerjaan awal, maka observasi real-time dilakukan secara kualitatif.

1.5. Metodologi Penelitian

Tahapan penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur.

Pada tahap ini dilakukan studi literatur utamanya referensi [4]. Selain itu dipelajari juga tentang EXIT chart, prosedur pengukuran yang sudah dilakukan sebelumnya dan beberapa topik pendukung lain seperti, kanal nirkabel, inner receiver, dll.

2. Rekonstruksi ACC-DTC.

Pada tahap ini dilakukan proses rekonstruksi dari referensi [4] untuk memastikan ACC-DTC yang dirancang identik dengan aslinya.

3. Analisis konvergensi ACC-DTC.

Pada tahap ini dilakukan analisis konvergensi ACC-DTC dengan menggunakan EXIT chart.

4. Perancangan sistem untuk pengukuran ACC-DTC secara langsung di lapangan dan pengujinya.

Pada tahap ini dilakukan perancangan sistem untuk pengukuran ACC-DTC secara langsung di lapangan menggunakan LabVIEW dan NI USRP-2920 dan kemudian sistem ini diujicobakan langsung di lapangan, baik indoor ataupun outdoor.

5. Perancangan dan verifikasi pengembangan aplikasi ACC-DTC yang real-time.

Pada tahap ini dilakukan perancangan dan sekaligus verifikasi pengembangan aplikasi ACC-DTC yang real-time. Dalam proses perancangannya, dilakukan juga beberapa penyederhanaan perhitungan di ACC-DTC dan optimasi kode LabVIEWnya.

1.6. Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan motivasi pelaksanaan tesis ini, rumusan masalah, tujuan penelitian, dan batasan masalah.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini akan menjelaskan konsep dasar yang akan digunakan pada pelaksanaan tesis ini, termasuk di dalamnya adalah mengenai ACC-DTC, EXIT chart, NI-USRP, dan LabVIEW.

BAB III ANALISIS KONVERGENSI ACC-DTC

Bab ini akan menunjukkan hasil analisis EXIT chart pada ACC-DTC baik secara parcial (HI dan VI) dan keseluruhan. EXIT chart ini juga selanjutnya digunakan untuk tool analisis dalam melakukan penyederhanaan perhitungan estimasi korelasi link S-R. Analisis konvergensi penyederhanaan perhitungan ini juga melihat dari segi square

error. Akhirnya, komparasi BER dan FER ACC-DTC dengan menggunakan penyederhanaan ini dan ACC-DTC tanpa penyederhanaan ditampilkan juga pada bab ini.

BAB IV EKSPERIMENT ACC-DTC LANGSUNG DI LAPANGAN

Bab ini akan menjelaskan tentang prosedur eksperimen yang dilakukan, sistem arsitektur yang dirancang, hasil eksperimen, dan penjelasan sekilas mengenai aplikasi real-time ACC-DTC dengan menggunakan dua buah USRP.

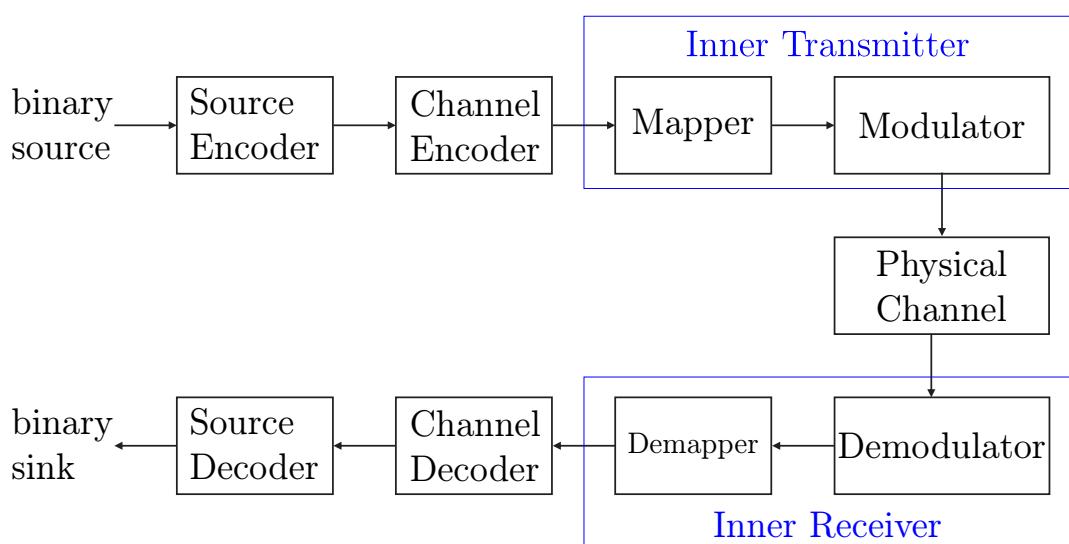
BAB V KESIMPULAN

Bab ini akan menyimpulkan hasil dari tesis ini. Selain itu, rangkuman kontribusi yang dilakukan pada tesis ini, daftar beberapa publikasi yang telah dan akan diajukan, dan saran untuk pengerjaan tesis ini lebih lanjut juga dijabarkan pada bab ini.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1. Sistem Komunikasi Digital



Gambar 2.1: Blok diagram model sistem komunikasi digital.

Gambar. 2.1 merupakan penyederhanaan blok diagram sistem komunikasi digital. Prinsip kerjanya adalah sbb, (1) *source encoder* mengurangi redundansi informasi dari *binary source* (kompresi), (2) *channel encoder* menambahkan redundansi informasi agar tahan terhadap kerusakan yang terjadi di *physical channel* dengan cara yang terdefinisi, (3) *mapper* berfungsi untuk memetakan bit ke simbol konstalasi, (4) *modulator* digunakan untuk mengubah sinyal agar dapat dikirimkan melalui *physical channel*. Sedangkan pada receiver, proses yang dilakukan merupakan keterbalikan dari proses pada transmitter. Perlu dicatat bahwa diagram ini menunjukkan asumsi sinkronisasi dan equalizer yang sempurna. Fokus penggerjaan tesis ini adalah pada bagian channel encoder.

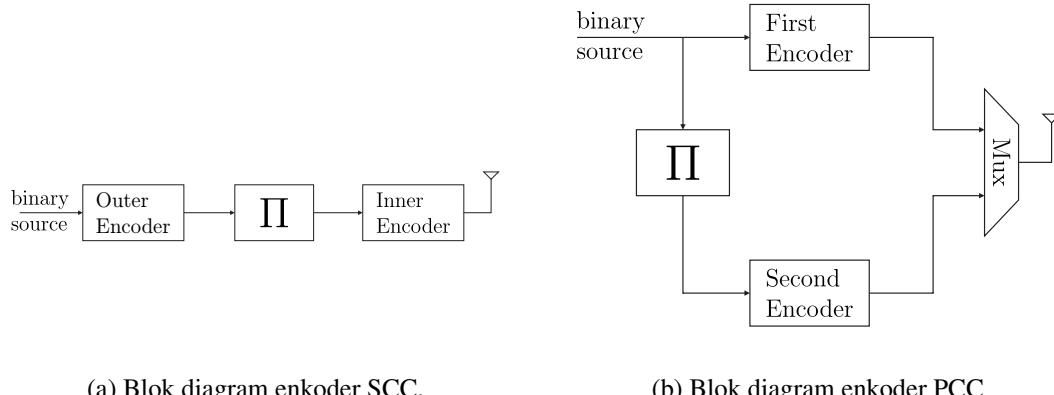
2.2. Channel Coding

Channel coding atau juga dikenal dengan *error correcting coding* (ECC) digunakan untuk merealisasikan transmisi data yang reliable walaupun melalui kanal yang memiliki noise dengan cara menambah redundansi informasi data dengan cara yang terdefinisi.

Berdasarkan cara kerjanya ECC dibagi menjadi dua jenis, yaitu *block code* dan *convolutional code* (CC). Sesuai dengan namanya, block code memproses input secara blok dari input bit, sedangkan convolutional code secara bit. Output convolutional code merupakan hasil proses konvolusi dari input dan generator polynomial. Secara strukturnya perbedaan utamanya terletak pada ada atau tidaknya memori. Pada tesis ini akan fokus pada CC.

Jenis convolutional juga dapat dibagi menjadi *systematic* dan *non-systematic* berdasarkan apakah bit input ikut dikirim atau tidak. Selain itu dapat juga dibagi menjadi *recursive* dan *non-recursive* berdasarkan ada atau tidaknya feedback.

Pada tahun 1979, kelas iteratif dekoding pertama kali diajukan di [43]. Terdapat dua jenis iteratif dekoding, yaitu *serial-concatenated-code* (SCC) dan *parallel-concatenated-code*. Pada tesis ini akan fokus di jenis SCC. Blok diagram encoder SCC dan PCC ditunjukkan pada Gambar 2.2. Notasi π adalah blok interleaver.



Gambar 2.2: Blok diagram enkoder SCC dan PCC.

2.2.1. Channel Dekoder

2.2.2. Log Likelihood Ratio

Konsep *log-likelihood ratio* (LLR) ini pada awalnya diperkenalkan oleh Robertson [44] untuk menyederhanakan transfer informasi antar komponen dekoder.

LLR dari bit input u_k dengan diketahui sinyal yang diterima \mathbf{y} , disebut dengan peluang *a posteriori*, didefinisikan sebagai berikut

$$L(u_k|\mathbf{y}) \triangleq \ln \left(\frac{P(u_k = +1|\mathbf{y})}{P(u_k = -1|\mathbf{y})} \right). \quad (2.1)$$

Pada persamaan di atas, perlu diperhatikan bahwa nilai $+1$ merepresentasikan bit 1 sedangkan nilai -1 merepresentasikan bit 0 . Untuk model kanal dengan modulasi BPSK, maka besar dari nilai LLR ini mengindikasikan kemungkinan nilai u_k yang benar. Misalnya jika $L(u_k) \gg 0$, maka kemungkinan besar nilai bitnya adalah 1 dan sebaliknya.

2.2.3. Algoritma Maximum A-Posteriori (MAP)

Pada tahun 1974, Bahl, Cocke, Jelinek, dan Raviv memperkenalkan algoritma MAP [45] yang dapat mengestimasi peluang *a posteriori* dari diagram trellis. Algoritma ini juga dikenal dengan nama algoritma BCJR yang diambil dari huruf depan keempat penemu algoritma tersebut. Mereka menunjukkan bagaimana algoritma mereka tidak hanya sanggup mengestimasi urutan bit, namun juga dapat mengestimasi peluang untuk masing-masing bit apakah sudah dilakukan proses dekoding dengan benar. Hal ini sangat penting untuk proses dekoding yang bersifat iteratif.

Diketahui u_k merupakan vektor decoded bit pada saat ke- k , \mathbf{y} merupakan vektor simbol yang diterima, \acute{s} dan s merupakan state sebelumnya dan state sekarang pada diagram transisi trellis, dimana $k = 0, 1, \dots, N - 1$ dan $s = S_0, S_1, \dots, S_{N-1}$, maka algoritma MAP adalah algoritma yang memaksimalkan peluang *a posteriori* $L(u_k|\mathbf{y})$ dan didapatkan solusi akhirnya sbb.

$$L(u_k|\mathbf{y}) \triangleq \ln \left(\frac{\sum_{\substack{(\dot{s}, s) \Rightarrow u_k = +1}} \beta_k(s) \cdot \gamma_k(\dot{s}, s) \cdot \alpha_{k-1}(\dot{s})}{\sum_{\substack{(\dot{s}, s) \Rightarrow u_k = -1}} \beta_k(s) \cdot \gamma_k(\dot{s}, s) \cdot \alpha_{k-1}(\dot{s})} \right). \quad (2.2)$$

Tiga komponen pada Persamaan. 2.2, yaitu $\gamma_k(\dot{s}, s)$, $\alpha_{k-1}(\dot{s})$, dan $\beta_k(s)$, yang masing-masing disebut dengan *branch*, *forward-recursion*, dan *backward-recursion metric*. Branch metric didapatkan dari persamaan berikut

$$\gamma_k(\dot{s}, s) = C \times \exp(u_k L(u_k)/2) \times \exp\left(\frac{L_c}{2} \sum_{l=1}^n y_{kl} x_{kl}\right), \quad (2.3)$$

dimana C adalah konstan yang akan tereliminasi pada Persamaan. 2.2, L_c adalah informasi dari kanal dengan $L_c = 2aE_b/\sigma^2$, $L(u_k)$ adalah *a priori* informasi yang didapat dari dekoder lainnya, E_b adalah energi per bit sinyal terkirim, σ^2 adalah noise variance, a adalah fading amplitude, dan \mathbf{x}_k adalah codeword yang dikirimkan. Sedangkan nilai forward-recursion metric didapat dari

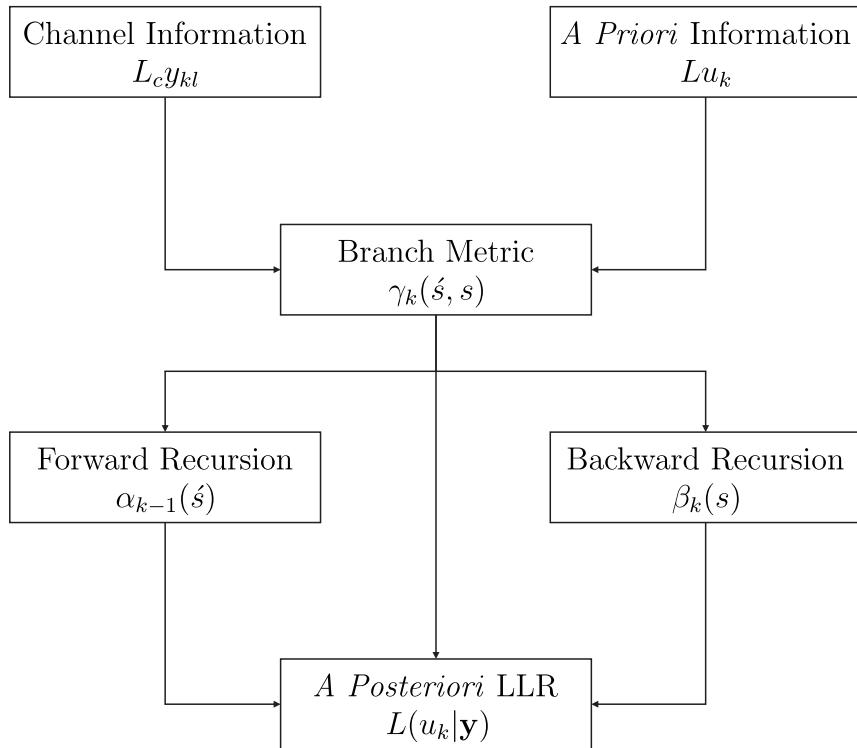
$$\alpha_k(s) = \sum_{\text{all } \dot{s}} \gamma_k(\dot{s}, s) \alpha_{k-1}(\dot{s}), \quad (2.4)$$

dimana $\alpha_0(S_0 = 0) = 1$ dan $\alpha_0(S_0 = s) = 0$, untuk $s \neq 0$. Nilai backward-recursion metric didapat dari

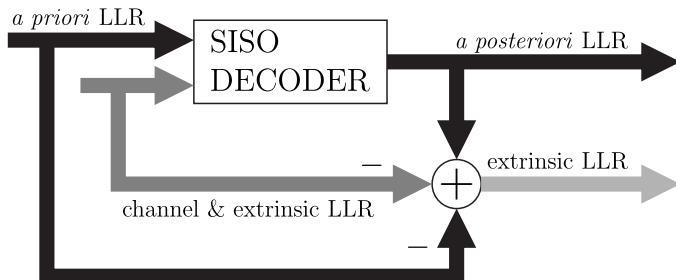
$$\beta_{N-1}(s) = \sum_{\text{all } \dot{s}} \gamma_N(\dot{s}, s) \beta_N(\dot{s}), \quad (2.5)$$

dimana $\beta_N(s) = 1$ untuk semua s . Secara keseluruhan perhitungan Persamaan. 2.2 dapat divisualisasikan dengan Gambar. 2.3.

Selanjutnya konsep yang penting mengenai iteratif dekoding adalah jenis soft information. Terdapat tiga jenis soft informasi di dalam iteratif dekoding, yaitu *a priori*, *a posteriori*, dan *extrinsic* information. Hubungan diantara ketiganya ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.3: Diagram algoritma MAP.



Gambar 2.4: Jenis soft informasi dan hubungan diantaranya.

2.2.4. Algoritma Max-log-MAP

Algoritma MAP di atas dapat disederhanakan menjadi algoritma Max-log-MAP. Dasar dari algoritma Max-log-MAP adalah pendekatan logaritma Jacobian seperti yang pertama kali digunakan oleh Erfanian [46]. Persamaan di bawah merupakan pendekatan yang digunakan algoritma Max-log-MAP ini.

$$\ln \left(\sum_i e^{x_i} \right) \approx \max_i(x_i). \quad (2.6)$$

Langkah pertama algoritma Max-log-MAP ini adalah mendeklarasikan ulang persamaan 2.2 menjadi

$$L(u_k|\mathbf{y}) \triangleq \ln \left(\frac{\sum_{(\dot{s}, s) \Rightarrow u_k = +1} \exp(A_{k-1}(\dot{s}) + B_k(s) + \Gamma_k(\dot{s}, s))}{\sum_{(\dot{s}, s) \Rightarrow u_k = -1} \exp(A_{k-1}(\dot{s}) + B_k(s) + \Gamma_k(\dot{s}, s))} \right) \quad (2.7)$$

, dengan $A_{k-1}(\dot{s}) \triangleq \ln(\alpha_{k-1})$, $B_k(s) \triangleq \ln(\beta_k(s))$, dan $\Gamma_k(\dot{s}, s) \triangleq \ln(\gamma_k(\dot{s}, s))$.

Sehingga dengan mensubstitusi persamaan 2.6 pada persamaan 2.7 akan didapatkan persamaan akhir dalam algoritma Max-log-MAP di bawah.

$$L(u_k|\mathbf{y}) \approx \max_{(\dot{s}, s) \Rightarrow u_k = +1} (A_{k-1}(\dot{s}) + B_k(s) + \Gamma_k(\dot{s}, s)) - \max_{(\dot{s}, s) \Rightarrow u_k = -1} (A_{k-1}(\dot{s}) + B_k(s) + \Gamma_k(\dot{s}, s)). \quad (2.8)$$

Hal ini berarti bahwa algoritma ini menghitung *a posteriori* LLR $L(u_k|\mathbf{y})$ untuk masing-masing bit u_k dengan mempertimbangkan setiap transisi dari S_{k-1} ke S_k yang menge-lompokkan grup antara kejadian nilai $u_k = +1$ dan $u_k = -1$. Untuk kedua grup ini, transisi memberi nilai maksimum dari $A_{k-1}(\dot{s})$, $B_k(s)$, $\Gamma_k(\dot{s}, s)$. *A posteriori* LLR dihitung hanya dengan berdasarkan nilai maksimum tersebut.

2.3. Accumulator-Assisted Distributed Turbo Codes (ACC-DTC)

ACC-DTC merupakan salah satu skema yang digunakan untuk mengoreksi kesalahan data yang diterima akibat dari noise yang terjadi di kanal nirkabel. Terdapat dua kata kunci yang membedakan ACC-DTC dengan teknik ECC lainnya, yaitu kode doping akumulator (*code doping accumulator*) [47] dan kode turbo [48] yang terdistribusi.

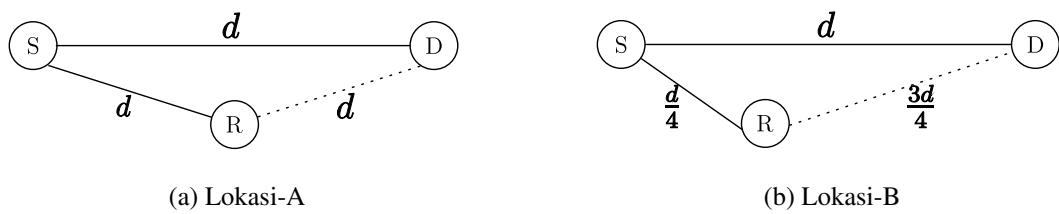
Kode doping tersebut diadopsi sebagai inner code pada skema SCC. Fungsi utama ditambahkannya kode doping disini adalah untuk menghilangkan fenomena *error floor* [49]. Fenomena error floor adalah kejadian dimana BER suatu sistem cenderung konstan walaupun nilai SNR-nya naik. Kemudian, penamaan kode turbo yang terdistribusi didasari dari strukturnya yang ketika dilihat secara global mirip dengan kode turbo yang menggunakan skema PCC dimana komponen enkodernya adalah enkoder SCC.

2.3.1. Pemodelan Sistem

Untuk mempermudah penulisan maka source, relay, dan destination node masing-masing akan dinotasikan dengan notasi S , R , dan D .

Skema transmisi data diasumsikan menggunakan mode *half-duplex*, dimana relay node dan destination node akan menerima data dari source node pada Phase-1, selanjutnya pada Phase-2, relay node akan mentransmisikan ulang data yang diterima pada Phase-1 dengan terlebih dahulu di enkode ulang lalu dikirimkan ke destination node. Gambar 2.5 menggambarkan slot waktu pengiriman data masing-masing node yang diwakili dengan jenis garis yang berbeda, yaitu garis sambung dan putus-putus.

Dengan diketahui jarak dari source node ke destination node sebesar $d_{SD} = d$, definisikan dua konfigurasi lokasi relay yang berbeda, yaitu lokasi-A dimana $d_{SR} = d_{RD} = d$ dan lokasi-B dimana $d_{SR} = d/4$ dan $d_{RD} = 3d/4$. Kemudian, besar *signal-to-noise ratio* (SNR) link-link ini dinotasikan masing-masing secara berurutan dengan γ_{SD} , γ_{SR} , dan γ_{RD} , dimana $\gamma_{SR} = g_{SR}\gamma_{SD}$, $\gamma_{RD} = g_{RD}\gamma_{SD}$ [50]. Variabel g_{SR} dan g_{RD} masing-masing merupakan gain dari link S-R dan link R-D, dimana $g_{SR} = (d_{SD}/d_{SR})^n$ dan $g_{RD} = (d_{SD}/d_{RD})^n$. Variabel n menyatakan *path-loss exponent* dengan $\{n \in \mathbb{R} | 2 \leq n \leq 6\}$ yang mana pada referensi [4] digunakan nilai $n = 3.52$. Oleh karena itu, untuk lokasi-A didapatkan nilai $\gamma_{SR} = \gamma_{RD} = \gamma_{SD}$, sedangkan untuk lokasi-B $\gamma_{SR} = \gamma_{SD} + 21.19$ dB, $\gamma_{RD} = \gamma_{SD} + 4.4$ dB.



Gambar 2.5: Pemodelan sistem dengan konfigurasi lokasi relay yang berbeda.

Pada sisi penerima, baik di destination node maupun di relay node, data yang diterima dapat diekspresikan sebagai

$$\mathbf{y}_{SD} = \sqrt{\gamma_{SD}} h_{SD} \mathbf{s} + \mathbf{n}_{SD}, \quad (2.9)$$

$$\mathbf{y}_{SR} = \sqrt{\gamma_{SR}} h_{SR} \mathbf{s} + \mathbf{n}_{SR}, \quad (2.10)$$

$$\mathbf{y}_{RD} = \sqrt{\gamma_{RD}} h_{RD} \mathbf{s}_R + \mathbf{n}_{RD}, \quad (2.11)$$

dimana h_{SD} , h_{SR} , dan h_{RD} merupakan gain kanal frequency-flat block-Rayleigh fading dan variabel $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{K \times 1}$ dan $\mathbf{s}_R \in \mathbb{R}^{K \times 1}$ masing-masing menyatakan vektor simbol yang dikirimkan dari source dan relay node. Vektor simbol ini dimodulasi menggunakan BPSK dengan panjang blok K -bit. Sedangkan, notasi \mathbf{n}_{SD} , \mathbf{n}_{SR} , \mathbf{n}_{RD} menyatakan vektor zero-mean AWGN noise.

2.3.2. Struktur Dekoder

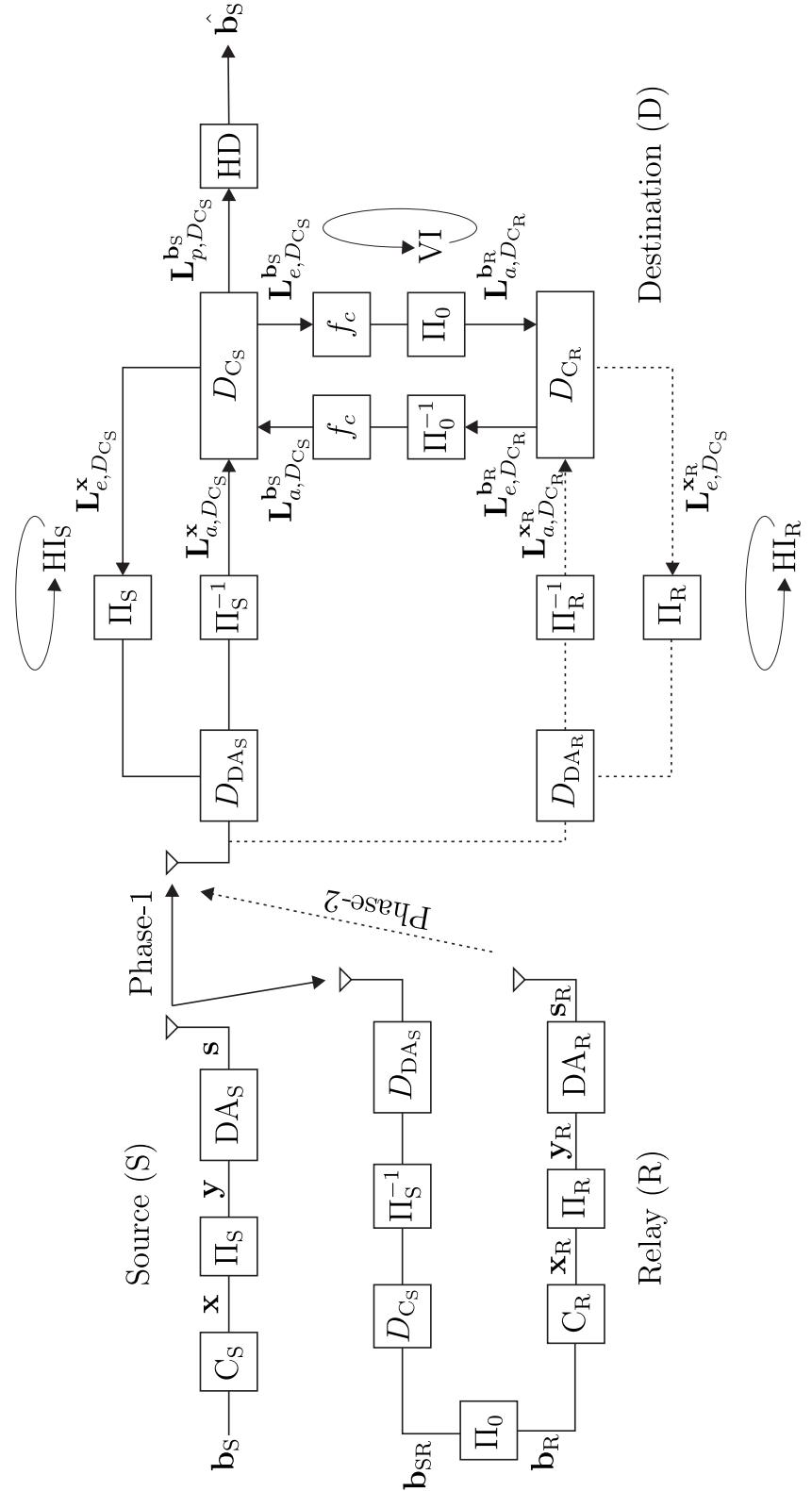
Gambar. 2.6 menggambarkan struktur keseluruhan dari ACC-DTC [4] dengan tambahan dan perubahan notasi yang sesuai. Kedua enkoder C_S dan C_R adalah memory-one *Non-Systematic Non-Recursive Convolutional Codes* (NSNRCC) dengan generatator polynomial $G = ([3, 2])_8$, lihat Gambar. 2.7a. Sementara itu, kedua DAs dan DA_R adalah Doped-Accumulator masing-masing dengan doping-rate P_R dan P_R , lihat Gambar. 2.7b, dimana $\ell \in \mathbb{N}^+$ [49].

Notasi Π menyatakan blok interleaver, dimana khusus untuk Π_0 digunakan menangani pertukaran informasi antara source node dan relay node di destination node, lihat Gambar. 2.6. Sedangkan untuk dekoder D_{DAs} , D_{DA_R} , D_{C_S} , dan D_{C_R} menggunakan algoritma BCJR [45]. Namun demikian, BCJR untuk D_{DAs} dan D_{DA_R} berbeda dengan BCJR untuk D_{C_S} dan D_{C_R} . BCJR untuk D_{DAs} dan D_{DA_R} harus dimodifikasi dengan cara mengombinasikan *a priori* LLR dari kanal dan dari outer dekoder, baik D_{C_S} atau D_{C_R} . Sedangkan untuk relay node, proses dekode dilakukan tanpa iterasi.

Di destination node, proses HI_S dilakukan pada Phase-1 sedangkan proses HI_R pada Phase-2. Kemudian, LLR ekstrinsik yang didapatkan dari HI_S dan HI_R diperbarui oleh fungsi updating $f_c(\cdot)$. Selanjutnya, didefinisikan kesalahan yang terjadi antara source node dan relay node dengan peluang $Pr(\mathbf{b}_S \neq \mathbf{b}_{SR}) = p_e$. Namun, nilai p_e ini tidak diketahui di destination node. Oleh karena itu, estimasi dari p_e yang dinotasikan dengan \hat{p}_e didapatkan dari persamaan berikut

$$\hat{p}_e = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\exp(\mathbf{L}_{p,D_{C_S}}^{\mathbf{b}_S}) + \exp(\mathbf{L}_{p,D_{C_R}}^{\mathbf{b}_R})}{(1 + \exp(\mathbf{L}_{p,D_{C_S}}^{\mathbf{b}_S}))(1 + \exp(\mathbf{L}_{p,D_{C_R}}^{\mathbf{b}_R}))}, \quad (2.12)$$

dimana N menyatakan jumlah dari *a posteriori* LLR yang layak. LLR yang tidak layak mungkin terjadi pada awal-awal proses iterasi, utamanya pada iterasi pertama [7]. LLR yang tidak layak ini akan menurunkan performa dari perhitungan nilai estimasi peluang kesalahan \hat{p}_e . Maka dari itu, sebuah nilai threshold T digunakan untuk



Gambar 2.6: Blok diagram *Accumulator-Assisted Distributed Turbo Codes* (ACC-DTC)



(a) C_S dan C_R : *Non-Systematic Non-Recursive Convolutional Code* (NSNRCC), $G = ([3, 2])_8$ (b) D_{C_S} dan D_{C_R} : Doped Accumulator dengan doping-rate P

Gambar 2.7: Struktur Enkoder ACC-DTC.

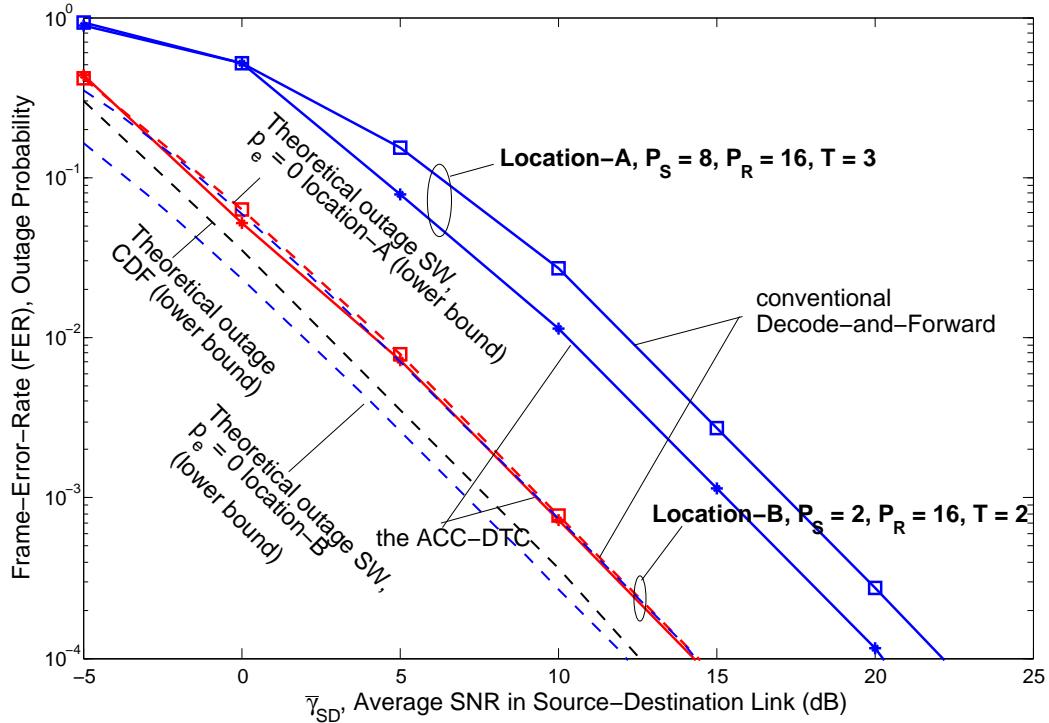
mengatasi masalah tersebut. Cara kerjanya adalah sebagai berikut, *a posteriori* LLR yang memenuhi pertidaksamaan $L_{p,D_{C_S}}^{b_S} > T$ dan $L_{p,D_{C_R}}^{b_R} > T$ digunakan dalam proses perhitungan. Lalu, nilai estimasi peluang kesalahan \hat{p}_e dapat digunakan oleh fungsi updating f_c yang dinyatakan sebagai

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{e,updated} &= f_c(\hat{p}_e, \mathbf{L}_e), \\ &= \ln \frac{(1 - \hat{p}_e) \exp(\mathbf{L}_e) + \hat{p}_e}{(1 - \hat{p}_e) + \hat{p}_e \exp(\mathbf{L}_e)}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Pada akhirnya, proses *Hard Decision* (HD) dilakukan dengan masukan *a posteriori* LLR dari D_{C_S} untuk mendapatkan estimasi data bit \hat{b}_S .

2.3.3. Perbandingan Antara ACC-DTC dengan Strategi Konvensional *Decode-and-Forward*

Pada bagian ini akan ditunjukkan pengaruh error yang terjadi pada kanal S-R. Simulasi dilakukan dengan panjang blok $K = 10000$ -bit, H_{IS} dan H_{IR} terjadi sebanyak 50 kali, dan VI sebanyak 5 kali. Hasil simulasinya ditunjukkan pada Gambar. 2.8. Grafik lower bound didapatkan dari referensi [51]. Kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil yang didapat adalah jika jarak relay semakin dekat dengan source yang berarti error yang terjadi di S-R link semakin kecil maka gain coding antara strategi EF dan DF tidak terlalu signifikan dan sebaliknya.



Gambar 2.8: Perbandingan performa FER ACC-DTC dengan menggunakan strategi kooperatif EF dan DF.

2.4. Extrinsic Information Transfer (EXIT) Chart

2.4.1. Entropy dan Mutual Information

Pada bidang teori informasi, konsep *entropy* pertama kali diperkenalkan oleh Shannon pada tahun 1948 di [52]. Entropy didefinisikan sebagai ukuran dari ketidakpastian (*uncertainty*) dari sebuah random variable (r.v.). Sebuah r.v. diskrit X dan himpunan terbatas \mathcal{X} dengan *probability mass function* (pmf) $p(x) = \Pr\{X = x\}, x \in \mathcal{X}$. Entropy X didefinisikan sebagai

$$H(X) = \sum_{x \in \mathcal{X}} p(x) \log \left(\frac{1}{p(x)} \right). \quad (2.14)$$

Jika log menggunakan basis 2 maka entropy memiliki satuan bits.

Definisi tentang entropy dapat dikembangkan lebih lanjut untuk sepasang r.v. Diketahui diskrit r.v. X dan Y dengan joint pmf $p(x, y)$, maka joint entropy X dan Y didefinisikan sebagai

$$H(X, Y) = \sum_{x \in \mathcal{X}} \sum_{y \in \mathcal{Y}} p(x, y) \log \left(\frac{1}{p(x, y)} \right). \quad (2.15)$$

Sedangkan, conditional entropy dari r.v. X dengan diketahui r.v. Y . didefinisikan sebagai

$$H(X|Y) = \sum_{y \in \mathcal{Y}} p(y) H(X|Y=y) \quad (2.16)$$

$$= \sum_{y \in \mathcal{Y}} p(y) \sum_{x \in \mathcal{X}} p(x|y) \log \left(\frac{1}{p(x|y)} \right) \quad (2.17)$$

$$= \sum_{x \in \mathcal{X}} \sum_{y \in \mathcal{Y}} p(x, y) \log \left(\frac{1}{p(x|y)} \right). \quad (2.18)$$

Di teori informasi, ukuran lain yang sering digunakan adalah mutual information. Mutual information adalah ukuran dari satu r.v. yang terkandung di r.v. lain. Mutual information antara r.v. X dan r.v. Y didefiniskan sebagai

$$I(X; Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (2.19)$$

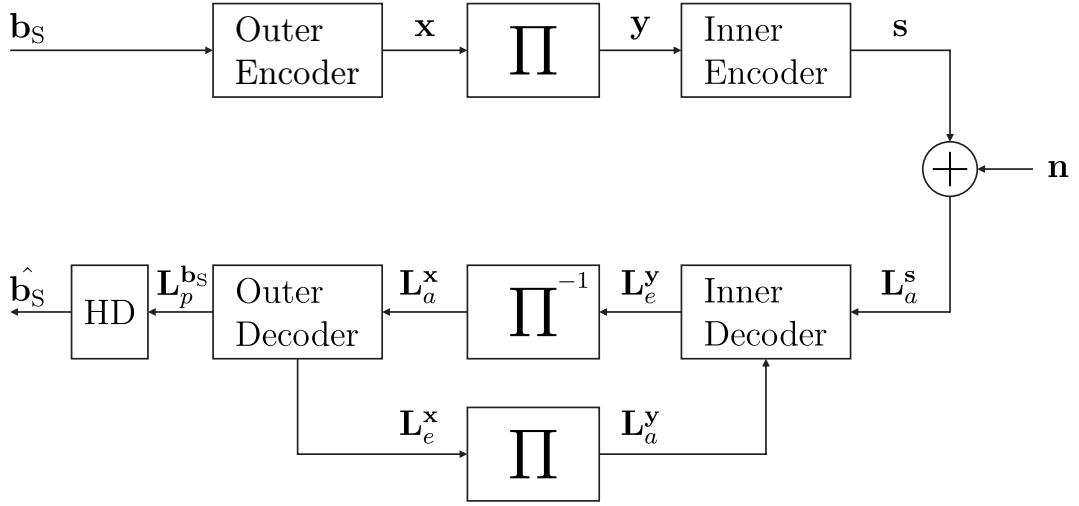
$$= H(Y) - H(Y|X) \quad (2.20)$$

$$= H(X) + H(Y) - H(X, Y). \quad (2.21)$$

2.4.2. Analisis EXIT Chart

EXIT chart untuk dekoder *soft-input soft-output* (SISO) pertama kali diperkenalkan oleh Stephen ten Brink pada tahun 2001 di [24]. EXIT chart merupakan sebuah tool yang baru yang baik digunakan untuk memahami sifat konvergensi dari teknik dekoding yang iteratif. Pertukaran informasi ekstrinsik antar dekoder dapat divisualisasikan dengan trajektori dekoding. Pada tesis ini akan fokus pada skema SSC seperti tampak pada Gambar. 2.9. Output LLR dari inner decoder dihasilkan dengan input LLR dari kanal dan dari outer dekoder. Sedangkan output LLR dari outer decoder dihasilkan hanya dari output LLR inner decoder.

Dari hasil pengamatan, pada [53] ditunjukkan bahwa *probability density function* (pdf)



Gambar 2.9: Blok diagram enkoder, model kanal AWGN, dan iteratif dekoder untuk SCC.

dari LLR ekstrinsik mendekasi distribusi gaussian. Oleh karena itu, LLR ekstrinsik dapat dimodelkan dengan model gaussian sbb.

$$\mathbf{L}_e = \mu_l u + n_l, \quad (2.22)$$

dengan u adalah transmisi bit yang diketahui, $\mu_l = \sigma_l^2/2$, dan n_l adalah zero-mean gaussian noise. Nilai σ_l dapat dicari dengan pendekatan inverse fungsi J dari [54], dengan diketahui nilai mutual informasi I , yang didefinisikan sbb.

$$\sigma_l = J^{-1}(I) \approx \left[-\frac{1}{0.3037} \log_2(1 - I^{1/1.1064})^{1/1.787} \right]. \quad (2.23)$$

Sedangkan nilai mutual informasi dapat dicari dengan metode histogram [53] atau dengan metode averaging sbb.

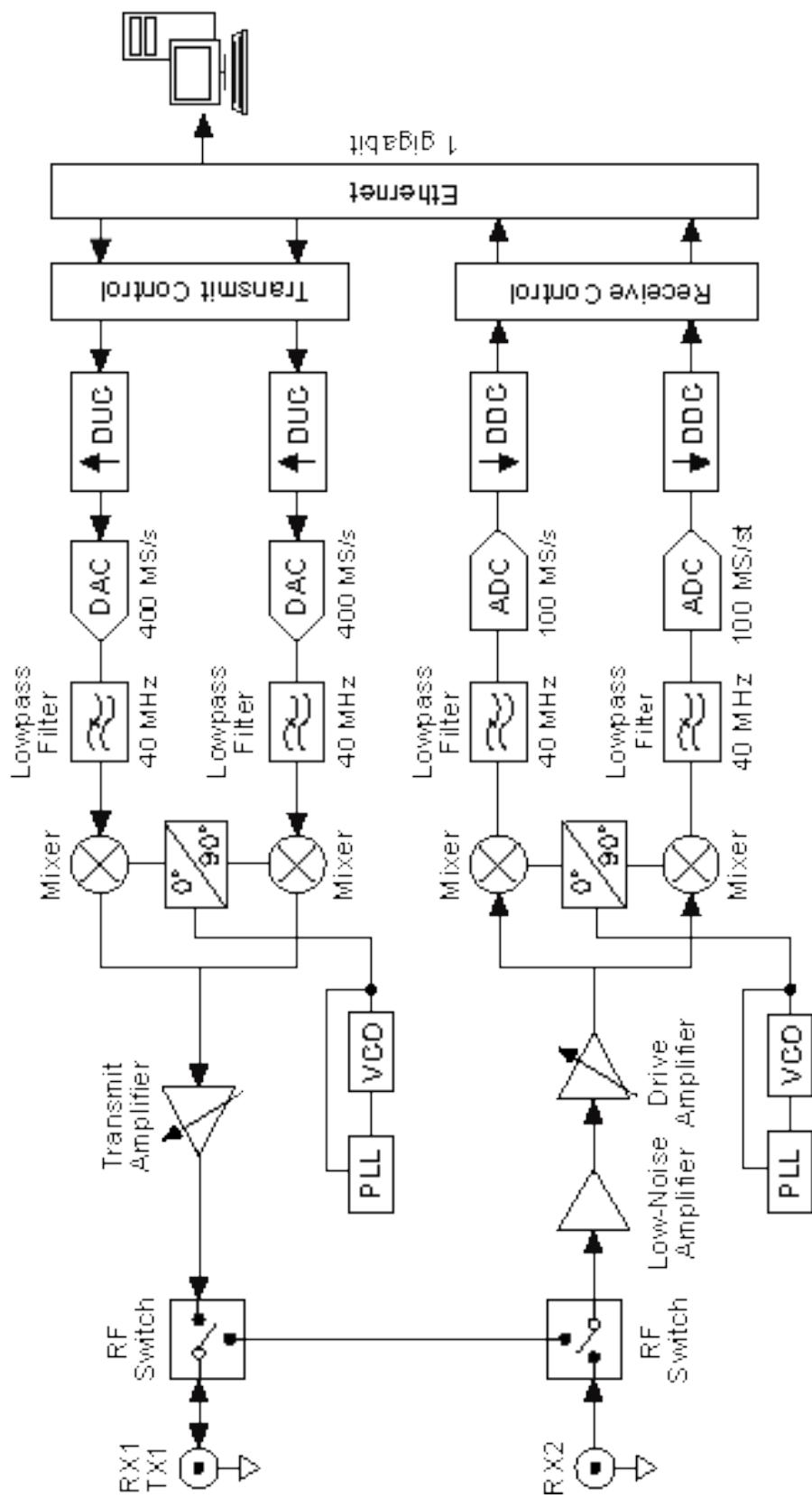
$$I(L; U) = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(1 + \exp^{-u_i L_i}). \quad (2.24)$$

Nilai mutual information sebenarnya dalam simulasi dapat divisualisasikan dengan trajektori dekoding. Jika tunnel antara kurva EXIT chart dan trajektori dekoding menca-

pai nilai mutual informasi (1,1) maka transmisi dapat diraih dengan hampir tidak ada error.

2.5. NI-USRP dan LabVIEW

Universal software radio platform (USRP) merupakan jenis SDR yang dapat dikonfigurasi langsung dari komputer. Gambar 2.10 menunjukkan blok diagram dari NI USRP-2920 [55]. Sebuah direct-conversion front end digunakan untuk mengubah sinyal RF ke sinyal baseband, komponen I/Q, dan sebaliknya. Data I/Q digital dilewatkan ke mixer, filter, dan decimator dengan parameter yang telah dikonfigurasi oleh user. Sample yang sudah di down-convert tersebut lalu dikirimkan ke komputer melalui koneksi gigabit ethernet. Sebuah FPGA digunakan untuk mengatur komunikasi antara komputer dan modul front-end. Di dalam FPGA tsb juga terdapat beberapa algoritma DSP untuk menangani kecacatan yang terjadi di bagian AFE. Board front-end yang digunakan oleh NI USRP-2920 adalah WBX-FE-Simple R6.0 Ettus Research LLC © 2011. Spesifikasi NI USRP-2920 terangkum dalam Tabel. 2.1. Pada tesis ini semua algoritma dijalankan di komputer dengan menggunakan sebuah graphical programming software buatan dari National Instrument yang dinamakan dengan LabVIEW, sehingga kecepatan pemrosesan banyak bergantung kepada kecepatan proses di komputer.



Gambar 2.10: Blok Diagram NI USRP-2920 [55].

Tabel 2.1: Tabel spesifikasi NI USRP-2920

Transmitter	Receiver	Power
Frequency range.....	50 MHz to 2.2 GHz	50 MHz to 2.2 GHz
Frequency step.....	<1 kHz	<1 kHz
Maximum Output Power (P_{out})		
50 MHz to 1.2 GHz.....	50 mW to 100 mW (17 dBm to 20 dBm)	0 dB to 31.5 dB
1.2 GHz to 2.2 GHz.....	30 mW to 70 mW (15 dBm to 18 dBm)	0.5 dB
Gain range ¹	0 dB to 31 dB	0 dBm
Gain step.....	1.0 dB	5 dB to 7 dB
Frequency accuracy ²	2.5 ppm	2.5 ppm
Maximum instantaneous real-time bandwidth ³		
16-bit sample width.....	20 MHz	20 MHz
8-bit sample width.....	40 MHz	40 MHz
Maximum I/Q sampling rate ⁴		
16-bit sample width.....	25 MS/s	25 MS/s
8-bit sample width.....	50 MS/s	50 MS/s
DAC.....	2 channels, 400 MS/s, 16 bit	2 channels, 100 MS/s, 14 bit
DAC SFDR.....	80 dB	ADC SFDR.....
		12 W to 15 W, typical, 18 W max
		Total power, typical operation.....

BAB 3

ANALISIS KONVERGENSI ACC-DTC

3.1. Analisis EXIT Chart ACC-DTC

Diketahui D_{DA_S} dan D_{C_S} masing-masing adalah inner decoder dan outer decoder. Mutual information yang akan diukur didefinisikan sebagai

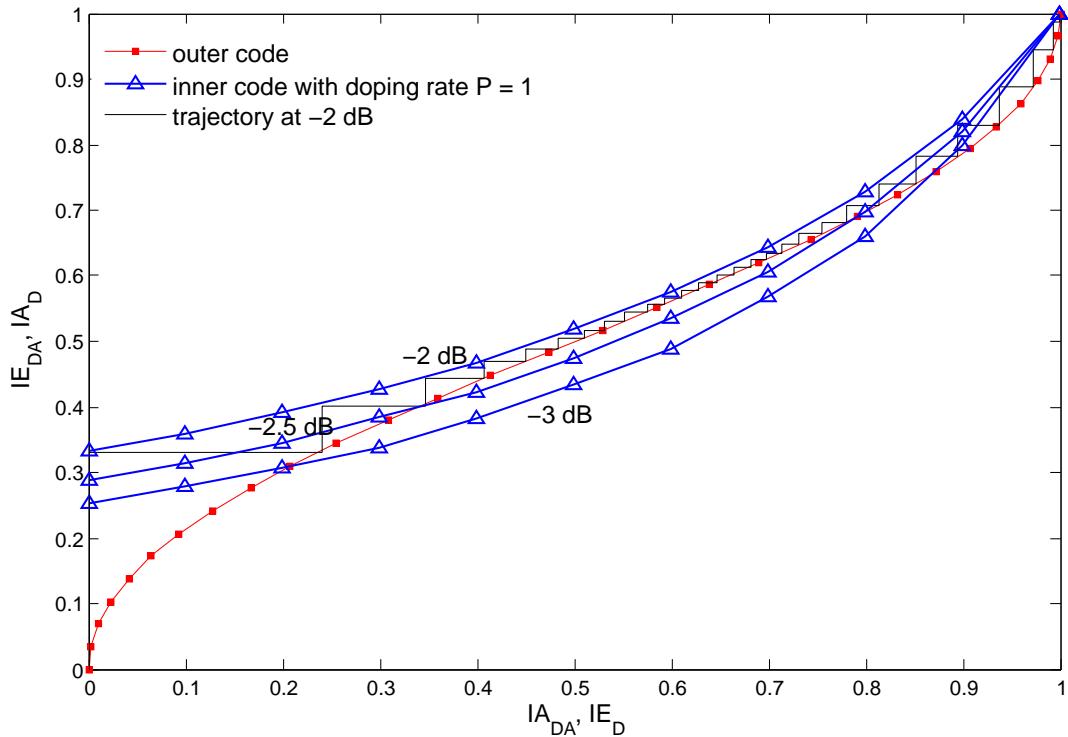
$$\begin{aligned} IA_D &\triangleq I(\mathbf{x}; \mathbf{L}_{a,D_C}^x), & IE_D &\triangleq I(\mathbf{x}; \mathbf{L}_{e,D_C}^x), \\ IA_{DA} &\triangleq I(\mathbf{y}; \mathbf{L}_{a,DA}^b), & IE_{DA} &\triangleq I(\mathbf{y}; \mathbf{L}_{e,DA}^b). \end{aligned}$$

Gambar. 3.1 menunjukkan EXIT chart¹ baik untuk HI_S atau HI_R ² di kanal AWGN. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar doping rate P , nilai SNR yang dibutuhkan juga semakin besar agar trajektori dekodingnya konvergen. Dengan jenis outer code yang sama, EXIT chart untuk outer code bergantung pada jumlah memori di outer enkoder [24]. Namun, 2D EXIT chart ini tidak menggambarkan pertukaran informasi di VI dan kinerja keseluruhan dari ACC-DTC.

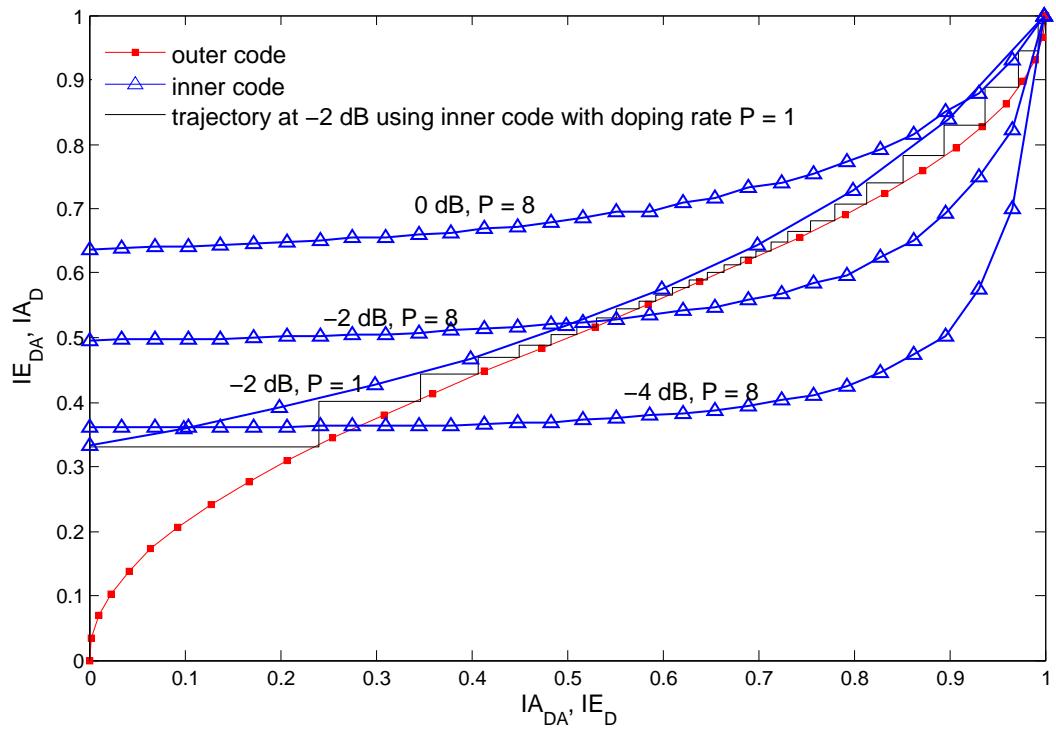
Untuk melihat dampak dari pertukaran informasi di VI, kita mengadopsi 3D EXIT chart dengan menggunakan model bit-flipping seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3.2. 3D EXIT chart dapat digunakan untuk melihat pengaruh perhitungan estimasi korelasi antara source dan relay. Pada Gambar. 3.3a menunjukkan bahwa ketika nilai P_e kecil ($P_e = 0.01$), IE_{DR} memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap pertukaran informasi di HI dibanding P_E yang lebih besar ($P_E = 0.25$). Namun perlu dicatat disini bahwa Gambar. 3.3b menunjukkan sifat simetris untuk nilai $P_E > 0.5$ karena sifat dari nilai entropy binernya yang simetris. Fenomena ini juga terjadi dalam analisis peluang outage untuk sistem satu relay dengan menggunakan model bit-flipping. Oleh karena itu, dengan hasil ini didapatkan ide untuk hanya mempertimbangkan nilai $0 \leq \hat{p}_e \leq 0.5$.

¹Parameter simulasinya sama.

²Keduanya identik.

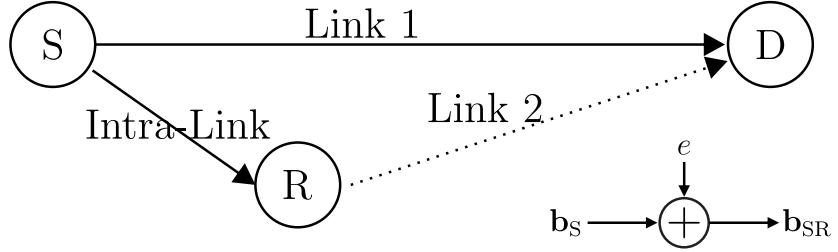


(a) 2D EXIT chart untuk doping-rate P sama tetapi nilai SNR berbeda.



(b) 2D EXIT chart untuk doping-rate P berbeda tetapi nilai SNR berbeda.

Gambar 3.1: EXIT chart untuk HI_S atau HI_R .



Gambar 3.2: Model bit-flipping.

Untuk melihat sifat konvergensi dari ACC-DTC secara keseluruhan pada kanal AWGN dapat dilihat dari plot trajektori dekodingnya. Gambar. 3.4 menunjukkan trajektori dekoding untuk lokasi dan nilai SNR yang berbeda. Jika mengacu pada [4], daerah turbo-cliff terjadi pada $\gamma_{SD} = -2.7$ dB untuk lokasi-A dan $\gamma_{SD} = -8.1$ dB untuk lokasi-B, maka Gambar. 3.4 menunjukkan prediksi yang akurat. Jika nilai γ_{SD} diturunkan 0.1 dB maka trajektori dekodingnya menjadi tidak konvergen.

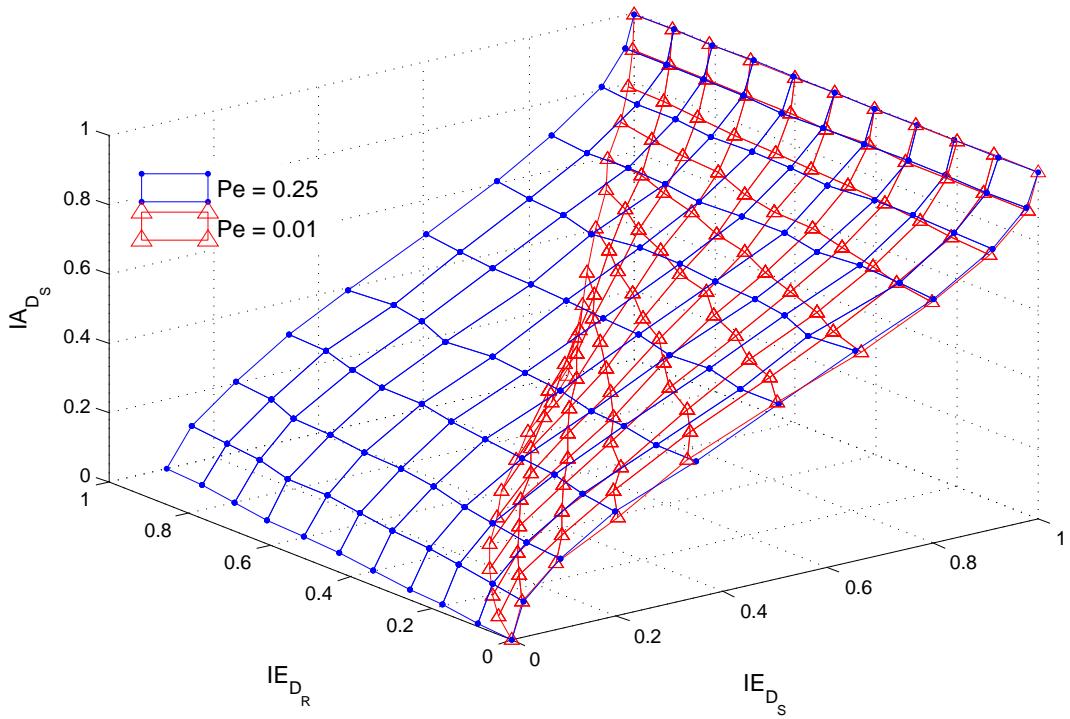
3.2. Penyederhanaan Perhitungan Korelasi Source-Relay

Jika melihat Persamaan. 2.12 dan Persamaan. 2.13 sangatlah jelas komputasinya sangat rumit dan bergantung pada nilai threshold T . Pendekatan ini dapat disederhanakan lebih lanjut. Penyederhanaan ini akan digunakan untuk mengembangkan aplikasi ACC-DTC secara real-time. Penyederhanaan yang dilakukan merupakan adaptasi metode Daneshgara [25] ke struktur dekoder ACC-DTC sebagai berikut

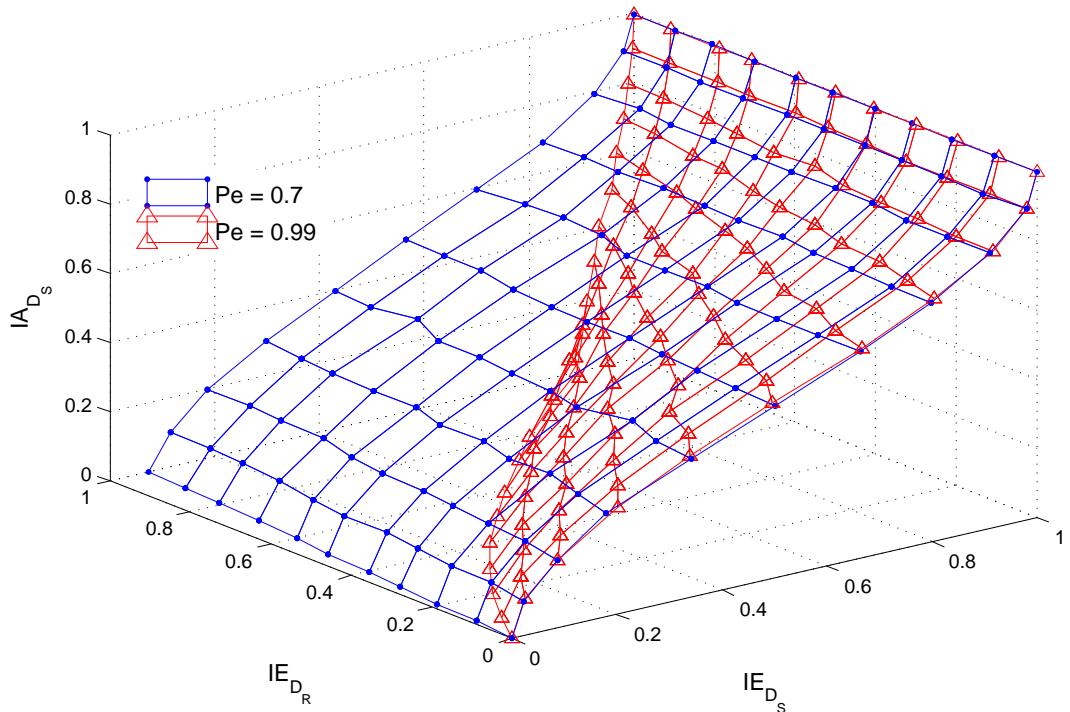
$$\mathbf{L}_{\hat{p}_e} \triangleq \log \left(\frac{1 - \hat{p}_e}{\hat{p}_e} \right), \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{e,updated} &= f_c(\mathbf{L}_{\hat{p}_e}, \mathbf{L}_e), \\ &\approx \max(\mathbf{L}_{\hat{p}_e} + \mathbf{L}_e, 0) - \max(\mathbf{L}_{\hat{p}_e}, \mathbf{L}_e), \\ &= \text{sgn}(\mathbf{L}_{\hat{p}_e}) \text{sgn}(\mathbf{L}_e) \min(|\mathbf{L}_{\hat{p}_e}|, |\mathbf{L}_e|), \end{aligned} \quad (3.2)$$

dimana $\hat{p}_e = w_H(\hat{\mathbf{b}}_S \oplus \hat{\mathbf{b}}_R)/K$ dan $w_H(\cdot)$ merupakan hamming weight dari argumennya.

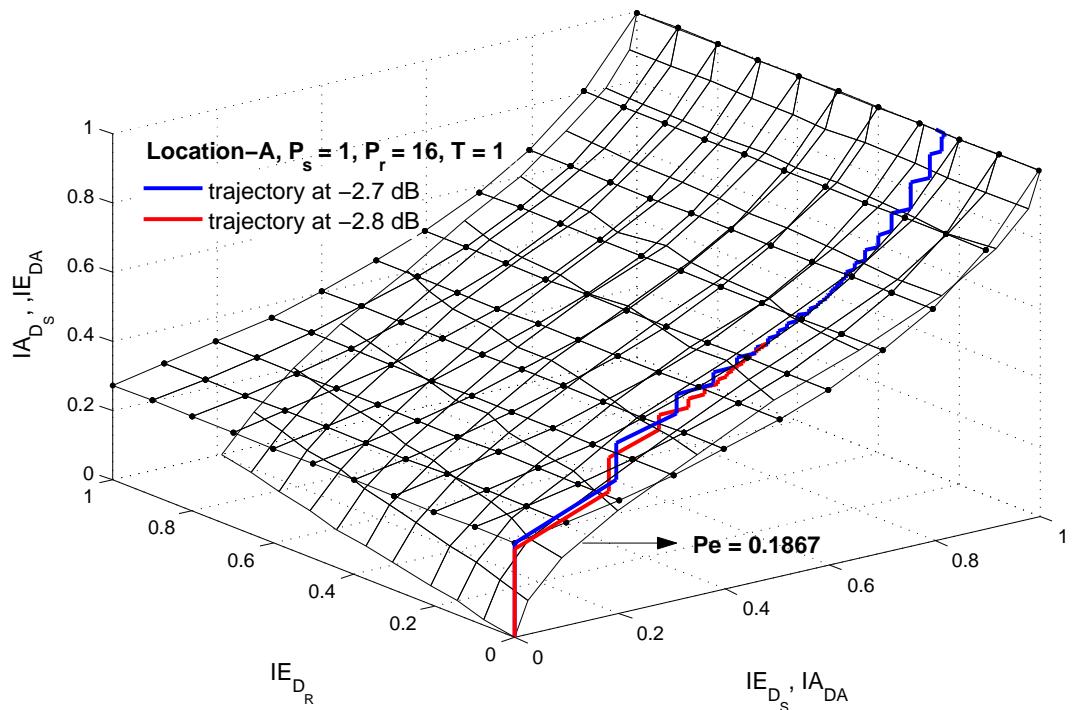


(a) 3D EXIT chart untuk VI dengan nilai peluang error di intralink Pe berbeda.

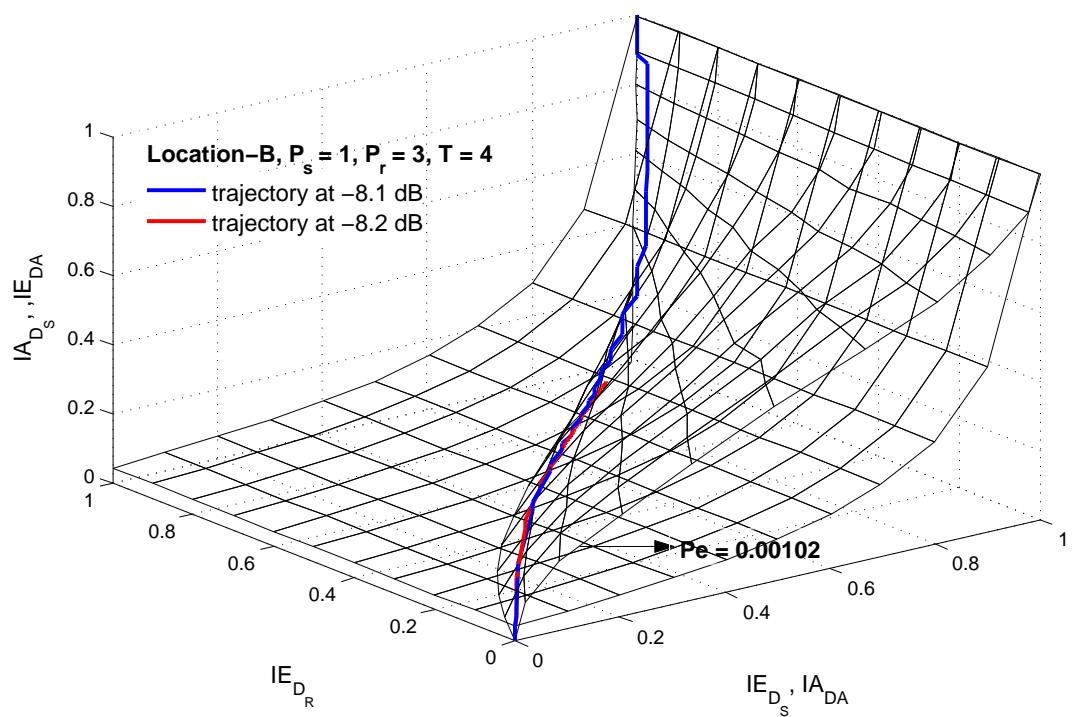


(b) Fenomena simmetris VI terhadap nilai peluang error di intralink $Pe = 0.5$

Gambar 3.3: 3D EXIT chart dengan menggunakan model bit-flipping.



(a) 3D EXIT chart untuk model lokasi-A.



(b) 3D EXIT chart untuk model lokasi-B.

Gambar 3.4: 3D EXIT chart untuk model lokasi-A dan lokasi-B

3.2.1. Konvergensi Square Error

Diketahui \hat{p}_e^i merupakan estimasi dari p_e pada iterasi ke- i , maka mean square error (MSE) didefinisikan sebagai

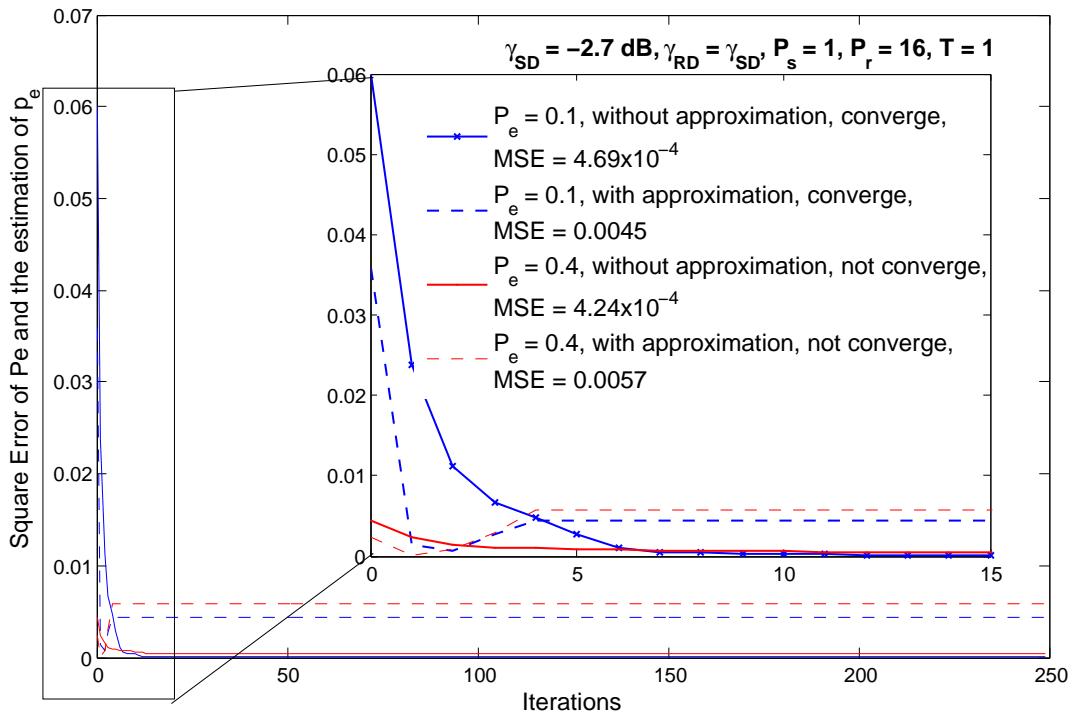
$$\text{MSE} \triangleq \frac{1}{50 \times 5} \sum_{i=0}^{(50 \times 5)-1} |Pe - \hat{p}_e^i|^2. \quad (3.3)$$

Untuk melihat sifat konvergensi dari square error $|Pe - \hat{p}_e^i|^2$ digunakan model bit-flipping. Gambar. 3.5 menunjukkan konvergensi dari square error $|Pe - \hat{p}_e^i|^2$ untuk semua iterasi. Anotasi "converge" dan "not converge" berkaitan dengan konvergensi trajektori dekoding dari 3D EXIT chart. Seperti yang tampak pada Gambar. 3.5a dan Gambar. 3.5b, keduanya konvergen dari segi square error $|Pe - \hat{p}_e^i|^2$. Tetapi, sifat konvergensi ini tidak menunjukkan jumlah iterasi yang dibutuhkan oleh ACC-DTC secara keseluruhan.

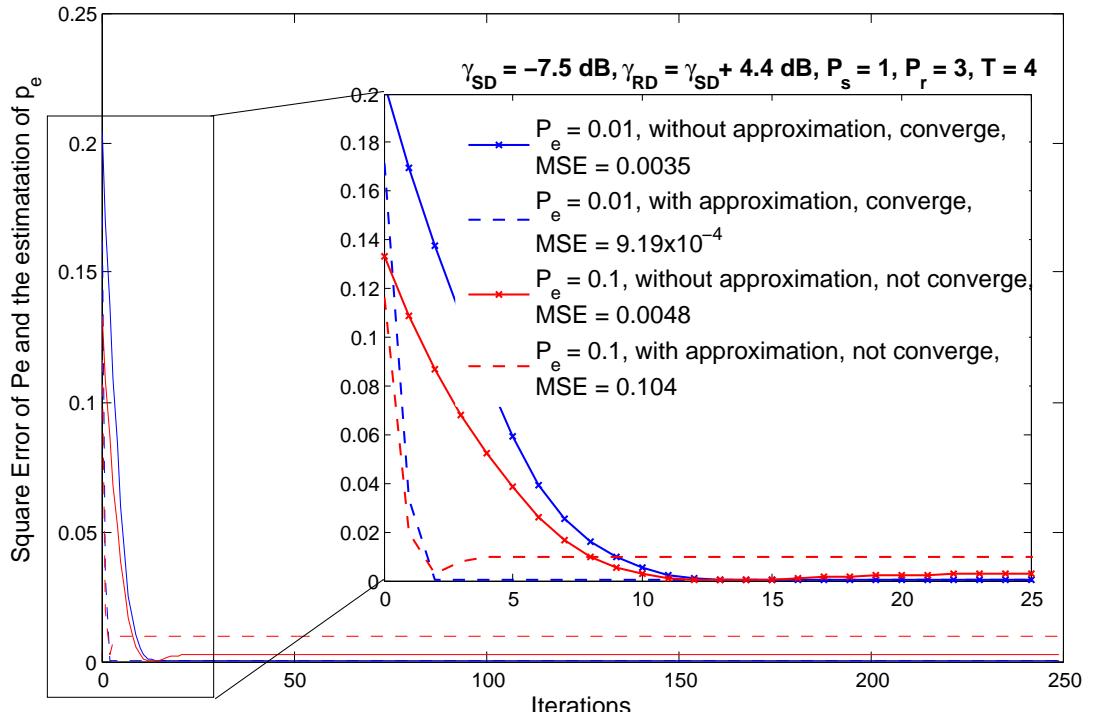
Fakta lain yang ditunjukkan pada gambar di atas adalah kombinasi dari perhitungan \hat{p}_e dan fungsi update LLR bekerja seperti sistem orde kedua yang memiliki overshoot. Sedangkan, jika menggunakan perhitungan aslinya, Persamaan. 2.12 dan Persamaan. 2.13, sistem tsb. bekerja seperti sistem orde pertama.

3.2.2. Analisis Menggunakan 3D EXIT Chart

Sama seperti yang sudah dilakukan sebelumnya, dengan menggunakan 3D EXIT chart, performa ACC-DTC dengan penyederhanaan perhitungan VI dapat diprediksi dengan baik seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3.6 dan Gambar. 3.7. Seperti yang telah ditunjukkan sebelumnya, baik menggunakan konfigurasi simulasi yang dilakukan pada Bab. 2.3.3 atau analisis 3D EXIT chart menggunakan model bit-flipping, bahwa error yang terjadi di link S-R berpengaruh pada performa di VI. Hal ini dapat dilihat bahwa jika menggunakan konfigurasi lokasi-A terdapat gain, yaitu 0.3 dB untuk BER dan 0.5 dB untuk FER, sedangkan gain tidak terlihat secara signifikan jika menggunakan konfigurasi lokasi-B.

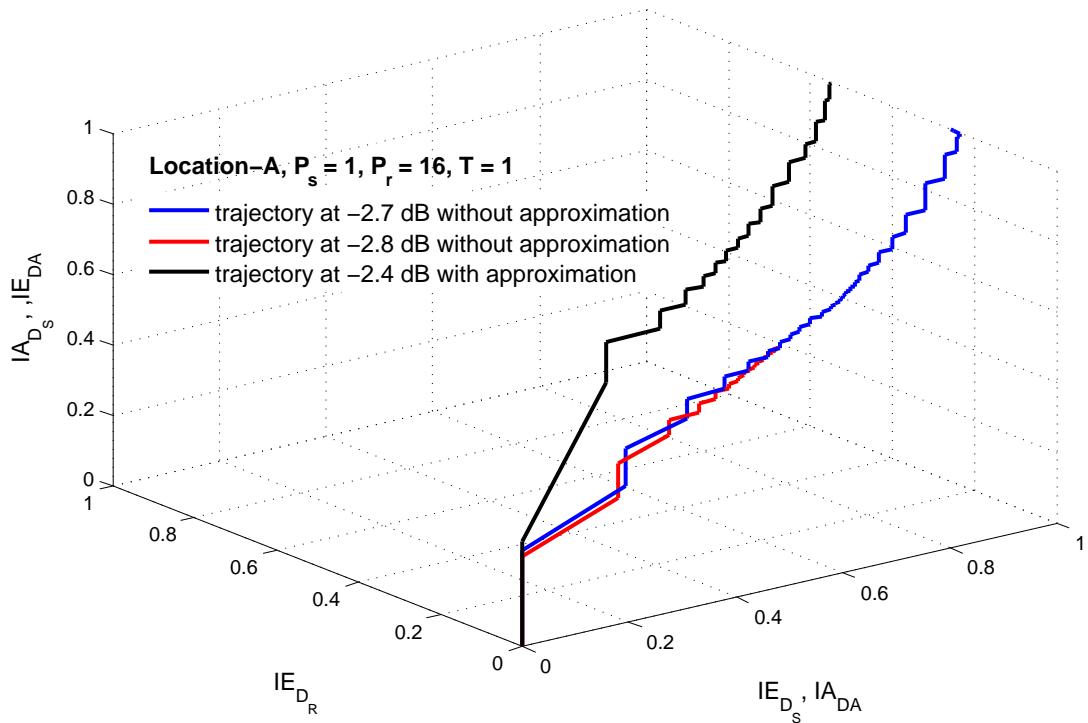


(a) Konvergensi square error $|Pe - \hat{p}_e^i|^2$ untuk semua iterasi dengan konfigurasi lokasi-A.

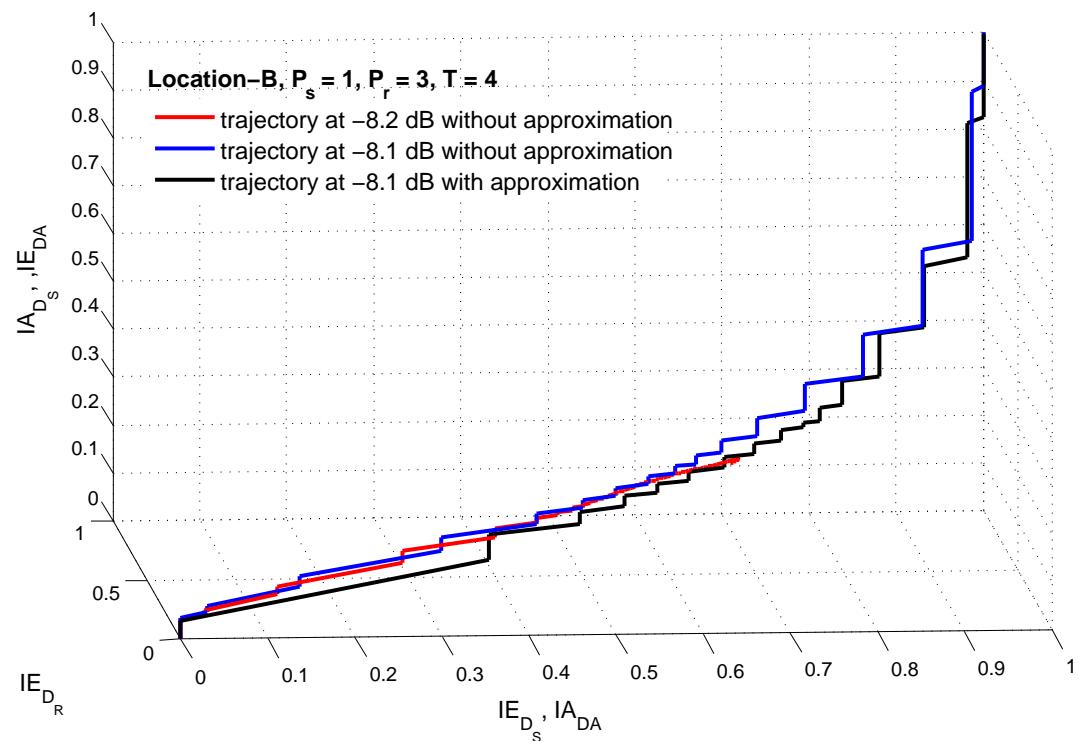


(b) Konvergensi square error $|Pe - \hat{p}_e^i|^2$ untuk semua iterasi dengan konfigurasi lokasi-B.

Gambar 3.5: Konvergensi square error $|Pe - \hat{p}_e^i|^2$ untuk semua iterasi dengan menggunakan model bit-flipping.

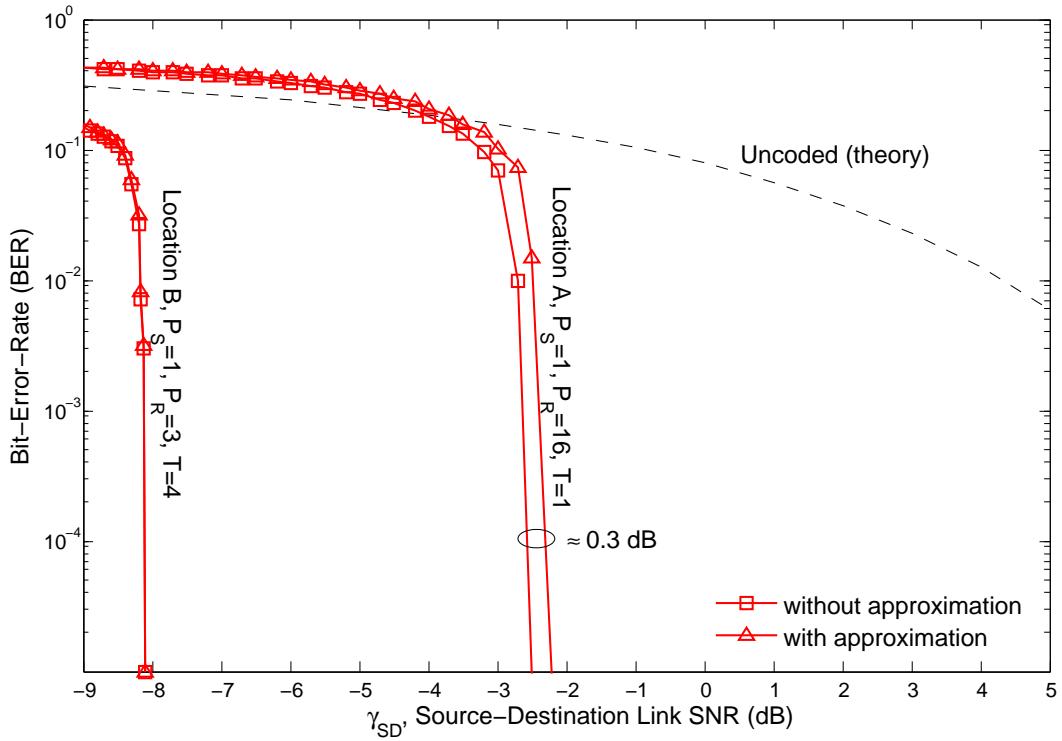


(a) Model seperti lokasi-A.

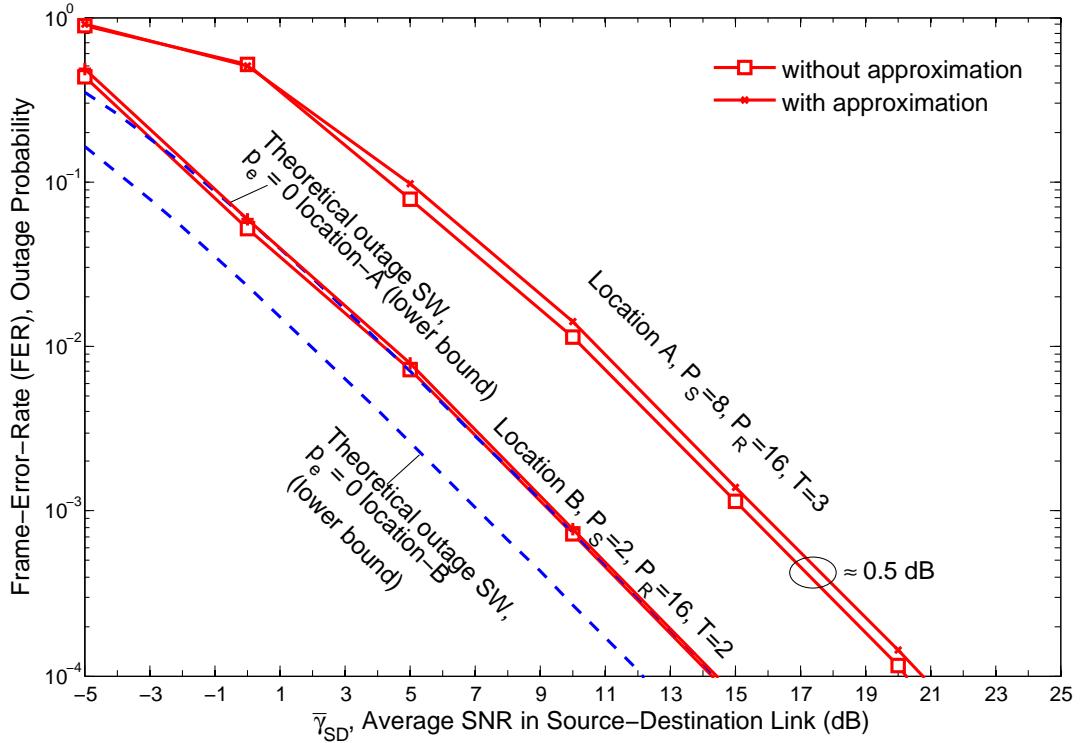


(b) Model seperti lokasi-B.

Gambar 3.6: 3D EXIT chart trajektori dekoding untuk melihat efek dari penyederhanaan perhitungan estimasi korelasi S-R terhadap performa secara keseluruhan.



(a) Performa BER.



(b) Performa FER.

Gambar 3.7: BER dan FER performa ACC-DTC dengan menggunakan penyederhanaan perhitungan estimasi korelasi S-R terhadap performa secara keseluruhan.

BAB 4

EKSPERIMEN ACC-DTC LANGSUNG DI LAPANGAN

4.1. Prosedur Eksperimen

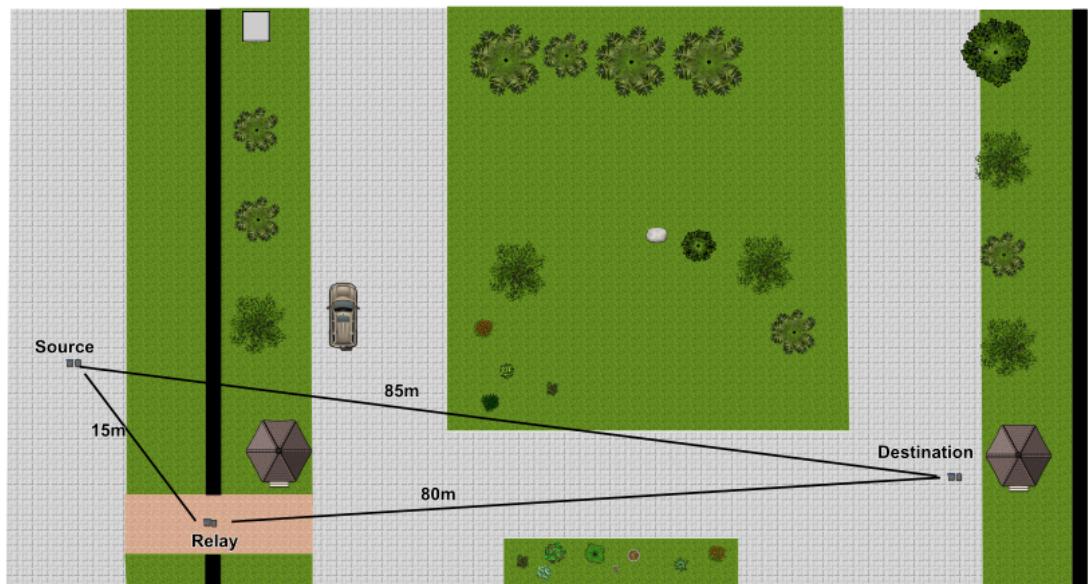
Pengukuran di lapangan dilakukan dengan konfigurasi penempatan node tampak seperti pada Gambar. 4.1 dan Gambar. 4.2. Terdapat kesamaan diantara keduanya, yaitu link antara S-R dan R-D adalah *line-of-sight* (LOS), tetapi link S-D tidak. Pada saat pengukuran tidak dibatasi ada tidaknya interaksi yang terjadi diantara ketiga link tsb., misalnya orang atau kendaraan lalu lalang. Hal ini dilakukan untuk melihat performa secara keseluruhan. Pemilihan konfigurasi tsb. dipilih semata-mata karena kemudahan. Gambar. 4.3 menunjukkan foto pada saat pengukuran di outdoor.

Sebagai transmitter, digunakan sebuah komputer (Intel® Core™ i5-2520M CPU @ 2.5GHz) dengan LabVIEW 2012, sebuah NI USRP-2920, dan sebuah antena dual-band 144/430 MHz dengan 2.15 dBi. Sedangkan sebagai receiver digunakan jenis peralatan yang sama kecuali sebuah komputer dengan spesifikasi Intel® Core™ 2 Duo CPU P8700 @ 2.5GHz. Pengukuran dilakukan pada frequency center $f_c = 433.92$ MHz. Di Indonesia, pengaturan spektrum frekuensi diatur oleh Direktorat Jenderal Pos dan Telekomunikasi (POSTEL). Pada spektrum 430-440 MHz, spektrum ini dialokasikan untuk radio amatir dan riset.¹

Pengukuran diversity order ACC-DTC dilakukan secara offline. Sehingga, paket yang diterima di receiver disimpan terlebih dahulu tanpa dilakukan proses apapun. Dengan cara ini, kita tidak terbebani untuk mengimplementasikan sistem secara real-time. Oleh karena itu, untuk pengukuran ini tidak perlu dilakukan optimasi atau penyederhanaan perhitungan.

Untuk jumlah data yang diambil, digunakan kaidah yang umum seperti pada simulasi monte-carlo, yaitu $100/\rho$ sample untuk mengestimasi nilai peluang ρ . Untuk lama pengukuran tidak harus dibatasi dengan waktu koheren kanal seperti yang dilakukan

¹Radio amatir juga mendapatkan alokasi secara penuh pada spektrum 144-146 MHz.

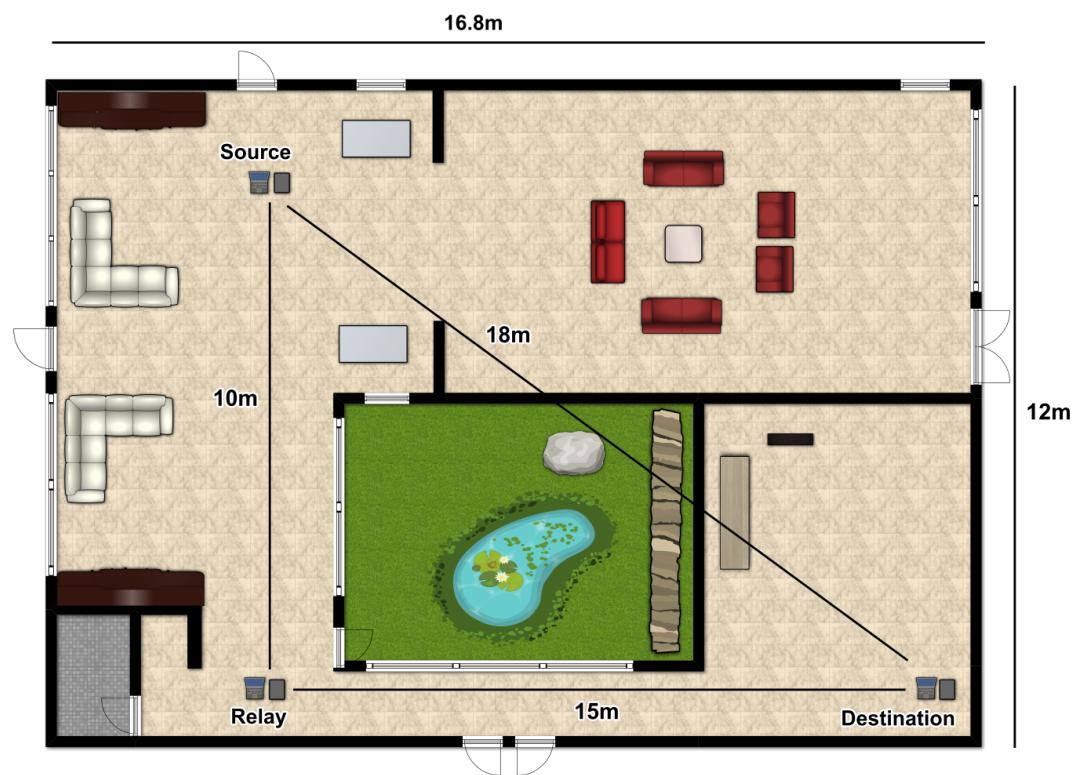


(a) Tampilan 2D konfigurasi pengukuran di outdoor.



(b) Tampilan 3D konfigurasi pengukuran di outdoor.

Gambar 4.1: Konfigurasi pengukuran di outdoor.



(a) Tampilan 2D konfigurasi pengukuran di indoor.



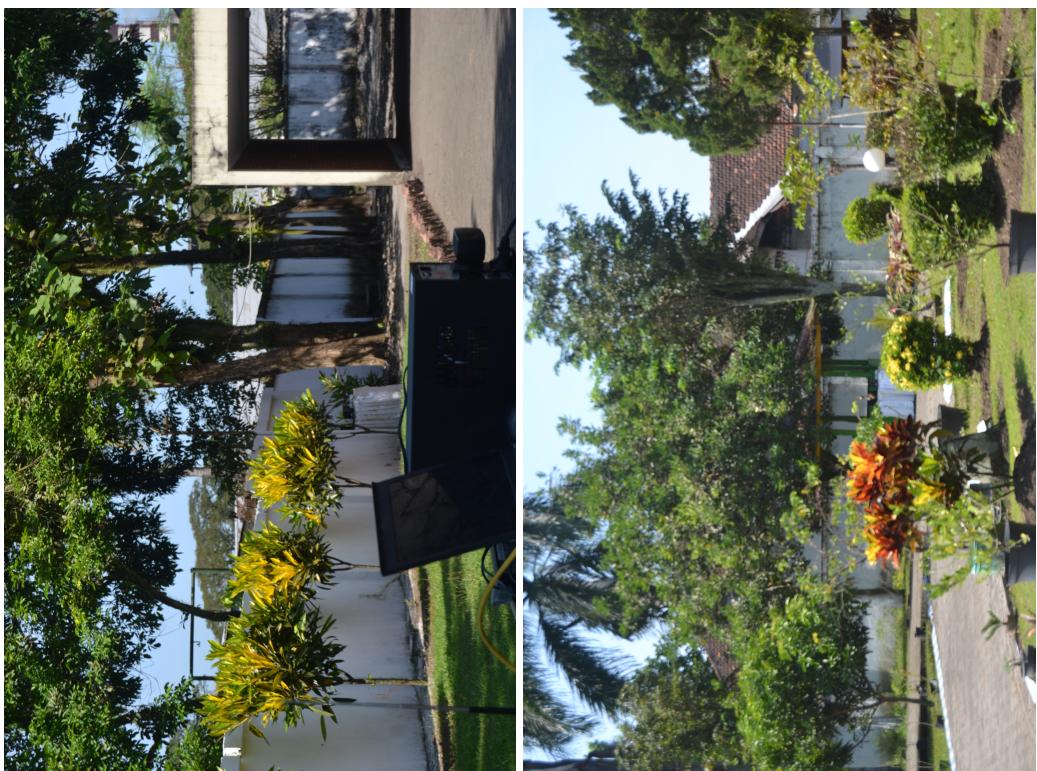
(b) Tampilan 3D konfigurasi pengukuran di indoor.

Gambar 4.2: Konfigurasi pengukuran di indoor.



(a) Foto source node.

(b) Foto relay node.



(c) Foto relay node dilihat dari source node.

(d) Foto destination node dilihat dari relay node.

Gambar 4.3: Foto pada saat pengukuran di outdoor.

pada [36] karena pengukuran yang kita lakukan bersifat statis. Waktu koheren kanal menandakan batas maksimum dimana impuls respon kanal masih memiliki korelasi dan tidak independen. Jika pengukuran dilakukan lebih dari waktu koherennya, maka sinyal dapat dikatakan melewati kanal yang berbeda secara impuls respon kanal [2].

4.2. Sistem Arsitektur

4.2.1. Pre-Processing : Periodogram

Dalam tesis ini, dilakukan juga pengukuran awal secara sekilas dan sederhana untuk melihat apakah ada interferensi atau kecacatan AFE. Kedua faktor ini pastinya sangat berpengaruh pada hasil pengukuran akhir nantinya. Metode yang diterapkan adalah sensing spektrum dengan menggunakan periodogram.

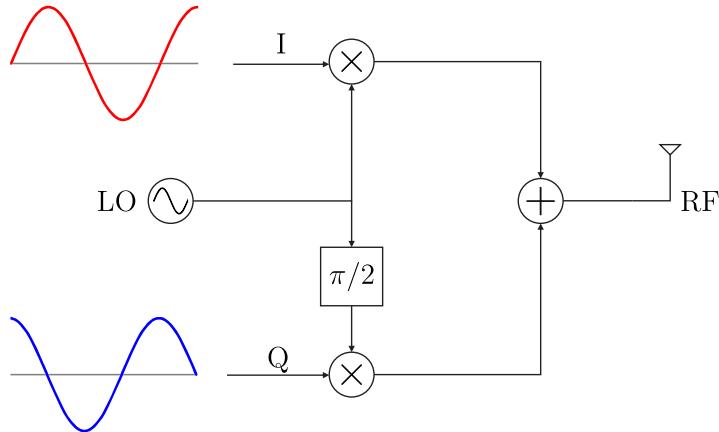
Pengukuran interferensi dilakukan secara acak, sebelum pengambilan data, dan sesudah penagmbilan data di spektrum 430-440 MHz. Hasil yang didapat tidak ditemukan sama sekali interferensi dari sumber lain.

Cara sederhana untuk melakukan pengujian kecacatan AFE adalah dengan cara memberi input masukan USRP dengan sinyal single-tone [56]. Deskripsi pengujian ini ditunjukkan pada Gambar. 4.4. Untuk menguji AFE sebagai transmitter maka sinyal yang dikirimkan USRP menggunakan kabel coaxial dan 30 dB attenuator dan ditangkap dengan sebuah R&S ® FSQ Signal Analyzer 20 Hz to 3.6 GHz. Hasilnya tampak seperti pada Gambar. 4.5.

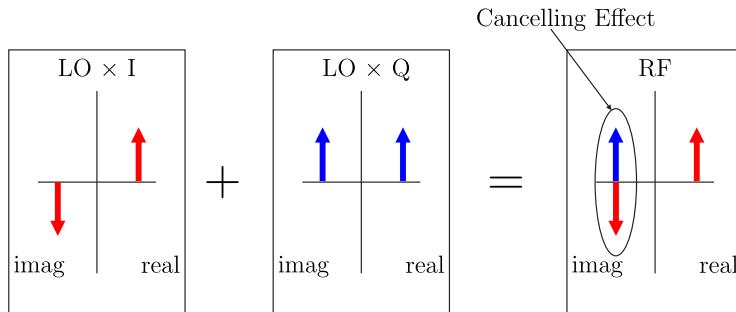
Sedangkan untuk menguji AFE sebagai receiver digunakan R&S ® CMW 500 Wideband Radio Control Tester untuk menghasilkan sinyal singe-tone. Grafik PSD sinyal basebandnya ditangkap oleh Control Panel LabVIEW seperti tampak pada Gambar. 4.6. Kedua gambar tsb. tidak menunjukkan adanya frekuensi harmonik. Sehingga dapat disimpulkan secara kualitatif bahwa kecacatan AFE tsb. telah diatasi dengan baik oleh FPGA di dalam NI USRP-2920. Penjelasan lebih analitis mengenai pengukuran kecacatan AFE dapat dibaca di [39].

4.2.2. Main-Processing : Layer Fisikal

Blok diagram yang dirancang pada tesis ini ditunjukkan pada Gambar. 4.7. Dalam proses perancangannya, banyak digunakan add-ons yang tersedia dari LabVIEW, yaitu



(a) Direct conversion AFE diberikan sinyal single-tone.



(b) Representasi grafik pada pengujian dengan memberikan sinyal single-tone.

Gambar 4.4: Pengujian kecacatan AFE dengan sinyal single-tone.

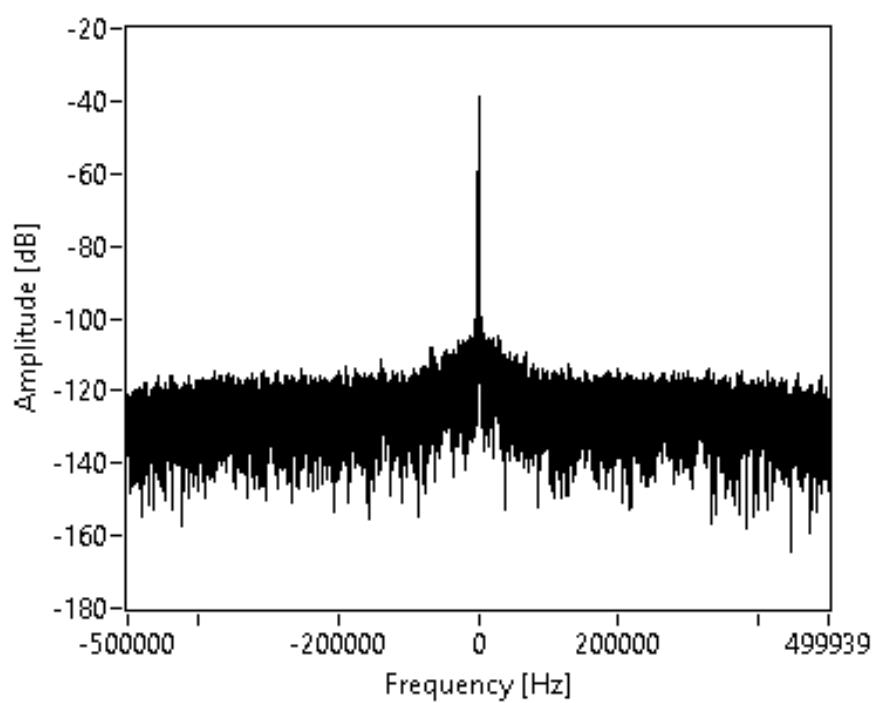
NI-USRP 1.2 [57] dan LabVIEW Modulation Toolkit 4.3.3 [58]. Dengan ini, proses perancangan menjadi lebih mudah dan cepat.

Mapper dari bit ke simbol berfungsi untuk memetakan input bit ke BPSK simbol, yaitu $\{\pm j\}$. Filter pulse-shaping yang digunakan agar sinyal yang dikirim bandlimited adalah root-raised-cosine filter dengan faktor roll-off $\alpha = 0.5$ dan panjang filter $L = 6$. Nilai sample per simbol dan frequency center dibuat tetap yakni 8 dan $f_c = 433.92$ MHz. Untuk konfigurasi ACC-DTC, interleaver yang digunakan adalah random interleaver, nilai doping rate $P_S = 2$, $P_R = 16$, dan nilai threshold $T = 2$. Sedangkan, nilai kecepatan simbol akan diubah untuk melihat efeknya.

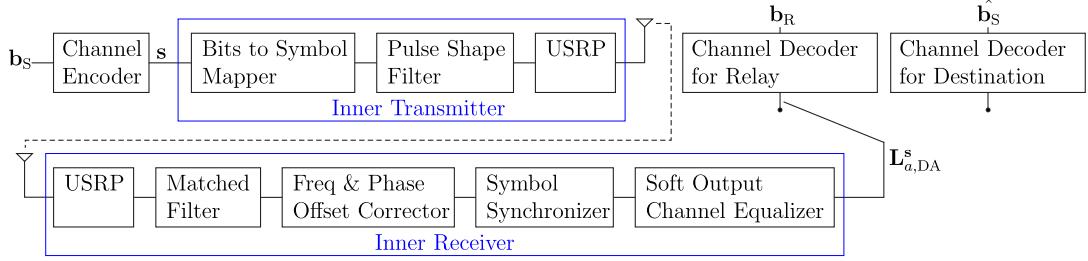
Di penerima, matched filter, koreksi frekuensi dan fasa, dan sinkronisasi simbol digunakan modul MT Modulate PSK.vi. Sedangkan, soft-output equalizer dirancang dengan menggabungkan modul MT PSK Feedforward Equalizer.vi dan sebuah soft decision device. Soft informasi tsb digunakan untuk dekoder pada ACC-



Gambar 4.5: Pengukuran dengan 1 kHz single tone dan frequency center $f_c = 433.92$ MHz dengan 1 MHz span.



Gambar 4.6: Tampilan control panel LabVIEW untuk pengukuran dengan 1 kHz single tone dan frequency center $f_c = 433.92$ MHz.



Gambar 4.7: Model komunikasi layer fisikal.

DTC.

Mengacu kepada dokumentasi modul equalizer LabVIEW di [59], teknik yang digunakan adalah adaptive feedforward equalization menggunakan algoritma *least-mean-squared* (LMS) untuk sinyal PSK. Modul ini akan disambungkan dengan sebuah soft decision device dari referensi [60] untuk simbol konstalasi $\{\pm a\}$ dan noise variance σ^2 dengan pendekatan sbb.

$$L(y(t)) = -\log(f_Y(y(t))), \quad (4.1)$$

dimana

$$f_Y(y(t)) = \left(\frac{\rho_1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{(y(t)+a)^2/2\sigma^2} + \frac{\rho_2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{(y(t)-a)^2/2\sigma^2} \right). \quad (4.2)$$

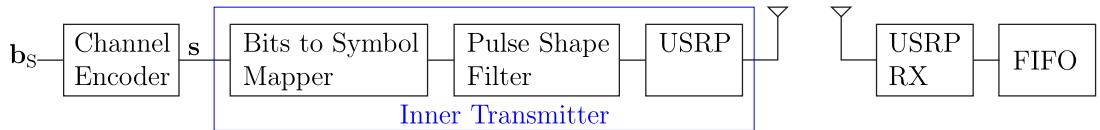
Sedangkan untuk perhitungan $e(t)$ digunakan pendekatan sbb.

$$e(t) = \frac{1}{\sigma^2} \left(y(t) - a \frac{e^{2ay(t)/\sigma^2} - 1}{e^{2ay(t)/\sigma^2} + 1} \right). \quad (4.3)$$

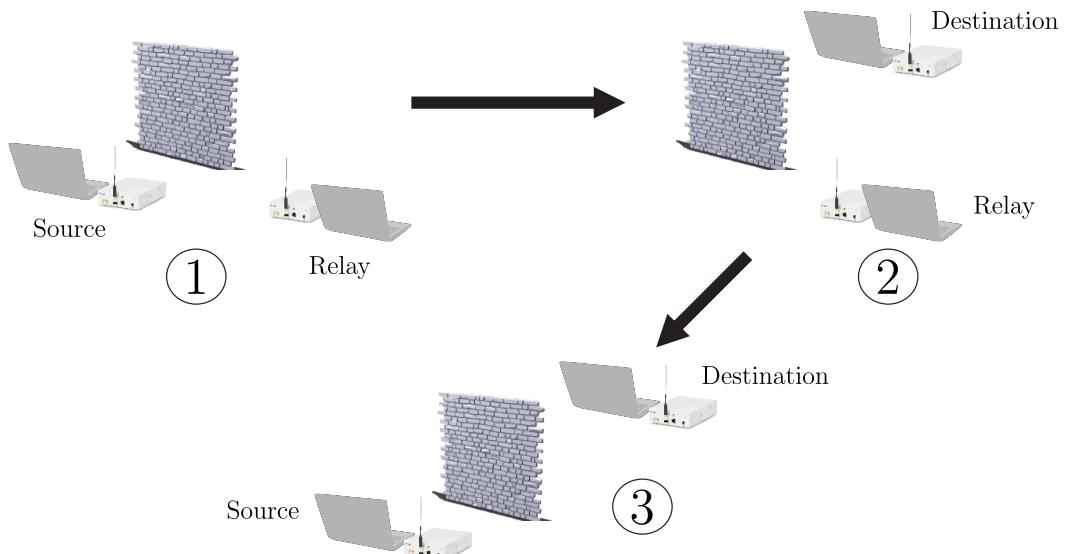
Sedangkan nilai noise variance σ^2 juga diupdate dengan

$$\sigma^2(t+1) = \kappa\sigma^2(t) + (1-\kappa)[\lambda(y(t)+a)^2 + (1-\lambda)(y(t)-a)^2], \quad (4.4)$$

dengan $\sigma^2(t=0) \approx E[e^2(t=0)]$ dan $\lambda = 1/(1+e^{2ay(t)/\sigma^2})$. Pada tesis ini digunakan nilai $\rho_1 = \rho_2 = 0.5$ dan $\kappa = 0.999$.



Gambar 4.8: Blok diagram mode transmit-receive-store.

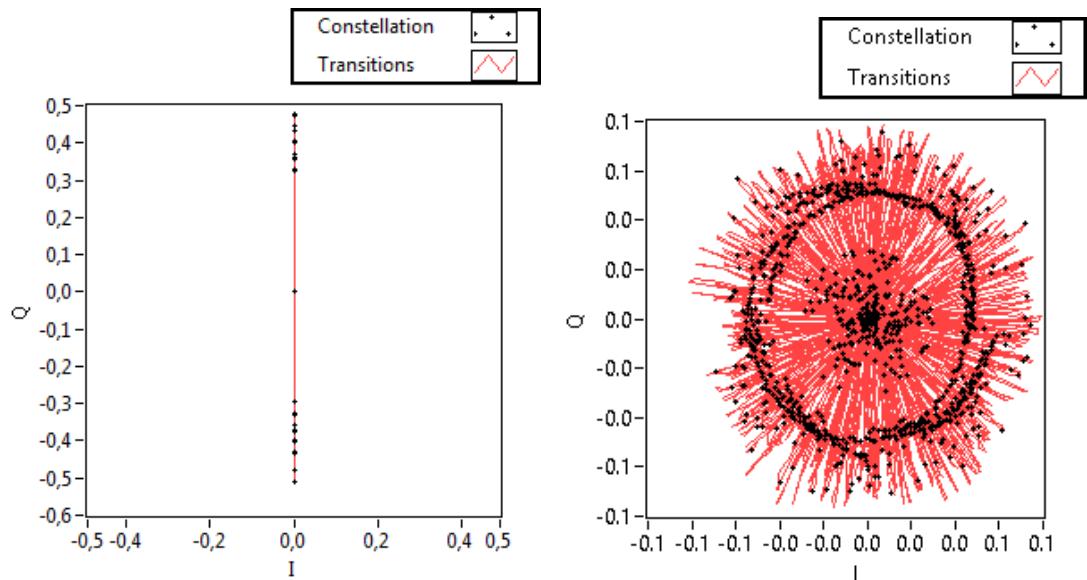


Gambar 4.9: Ilustrasi prosedur pengukuran diversity order ACC-DTC dengan menggunakan dua buah USRP.

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan dua buah USRP. Awalnya, data disimpan secara real-time seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 4.8. Kemudian data tersebut diolah secara offline.

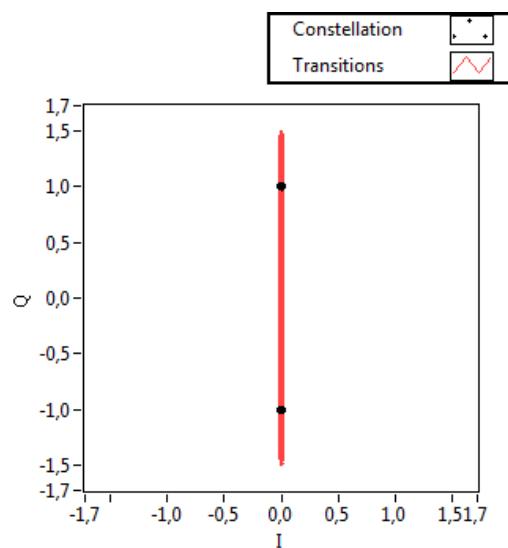
Prosedur pengukuran yang dilakukan adalah sbb. pertama, link S-R ditiru, kemudian data yang diterima dan didekode lalu disimpan, kedua link R-D ditiru, data yang didekode sebelumnya dienkripsi ulang dan dikirimkan ke destination node, ketiga, link S-R ditiru, data dari link S-D dan link R-D didekode bersama menggunakan ACC-DTC. Prosedur ini dapat diilustrasikan pada Gambar. 4.9.

Gambar. 4.10 dan Gambar. 4.11 menunjukkan salah contoh diagram konstalasi yang ditangkap pada saat pengukuran dan diagram PSD untuk kecepatan simbol $R_s = 25$ kbps di outdoor.



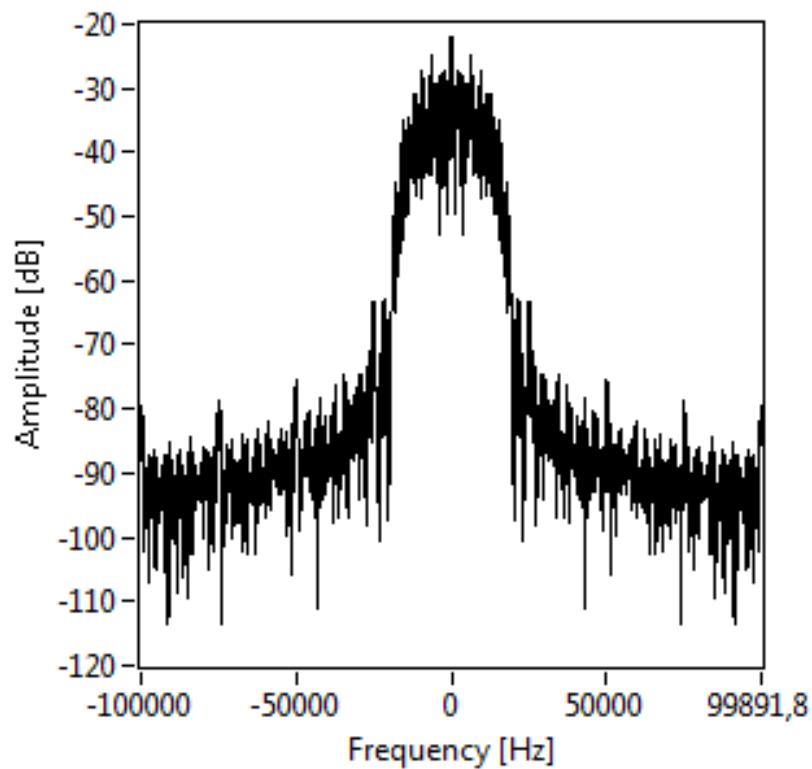
(a) Konstalasi di transmitter.

(b) Konstalasi sebelum melalui inner receiver.

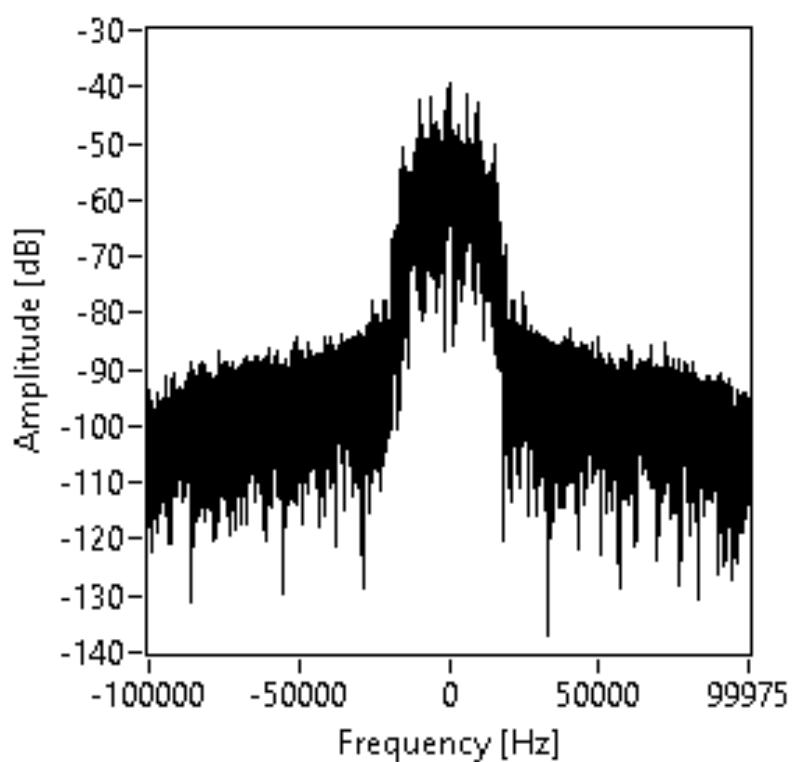


(c) Konstalasi keluaran dari inner receiver.

Gambar 4.10: Sample diagram konstalasi dengan pengukuran langsung di lapangan.



(a) Sample baseband PSD sinyal yang dikirim.



(b) Sample baseband PSD sinyal yang diterima.

Gambar 4.11: Sample baseband PSD sinyal yang dikirim dan diterima.

4.2.3. Post-Processing : Estimasi SNR

Pada kanal fading, daya sinyal yang diterima bervariasi setiap kali diukur. Oleh karena itu daya ini merupakan sebuah r.v. Seperti yang disebutkan di [31], melakukan estimasi SNR kanal fading tidak membantu karena bersifat acak. Namun, karena tujuan dari tesis ini adalah melihat diversity order, maka BER atau FER yang diukur harus terhadap nilai SNR. Oleh karena itu, dari sejumlah sample yang ada, dihitung nilai estimasi SNR untuk masing-masing realisasi kanal dan akhirnya dirata-ratakan.

Telah banyak teknik yang dikembangkan untuk mengestimasi nilai SNR. Beberapa teknik telah dirangkum di [41]. Pada umumnya BER atau FER diukur terhadap nilai SNR per simbol $\gamma_s \triangleq E_s/N_0$. Tanpa mengubah maknanya, notasi γ_s dapat disingkat dengan notasi γ . Definisi γ ini sesuai dengan definisi yang digunakan di referensi asli ACC-DTC [4] dan definisi dari [41] untuk kanal kompleks. Sama seperti pertimbangan sebelum-sebelumnya, yaitu karena alasan sederhana, maka teknik yang digunakan pada tesis ini adalah estimator method of moments (MM).

Diketahui sinyal yang diterima melalui kanal AWGN didefinisikan sebagai

$$\mathbf{y} = \mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (4.5)$$

dimana $\mathbf{y} = [y_1 y_2 \dots y_N]^T$ dan $\mathbf{n} = [n_1 n_2 \dots n_N]^T$. Kemudian, estimator MM mengestimasi dengan perhitungan sbb.

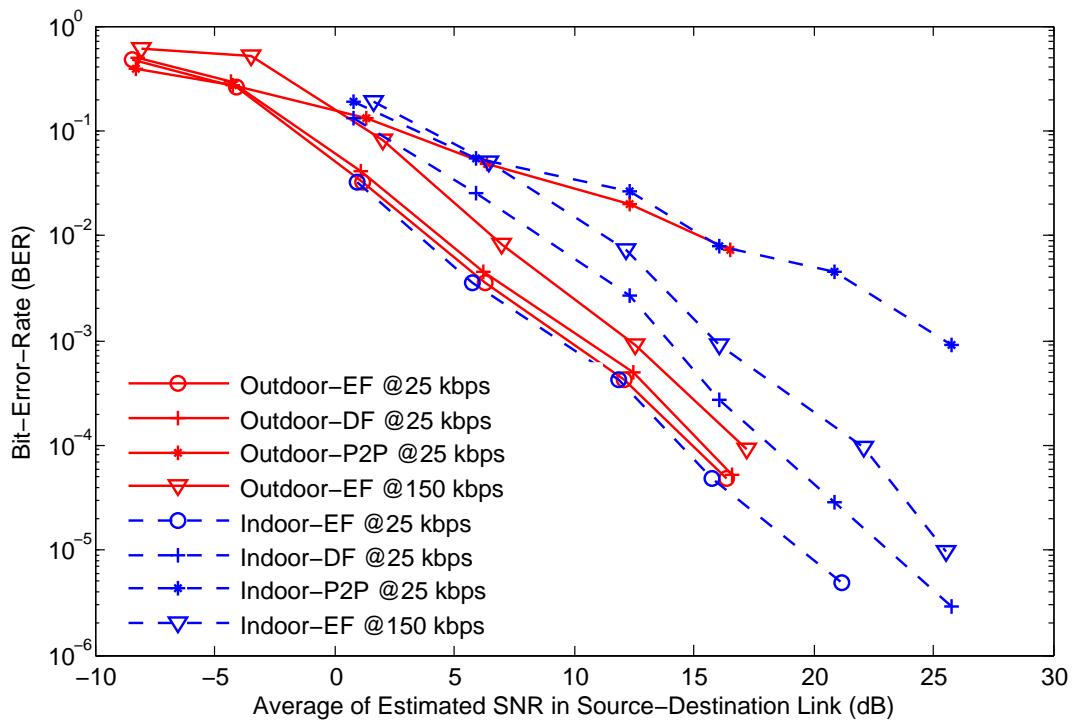
$$\hat{\gamma}_{MM} = \frac{\sqrt{2\hat{m}_2^2 - \hat{m}_4}}{\hat{m}_2 - \sqrt{2\hat{m}_2^2 - \hat{m}_4}}, \quad (4.6)$$

dimana $\hat{m}_2 \triangleq (1/N) \sum_{i=1}^N |y_i|^2$ and $\hat{m}_4 \triangleq (1/N) \sum_{i=1}^N |y_i|^4$.

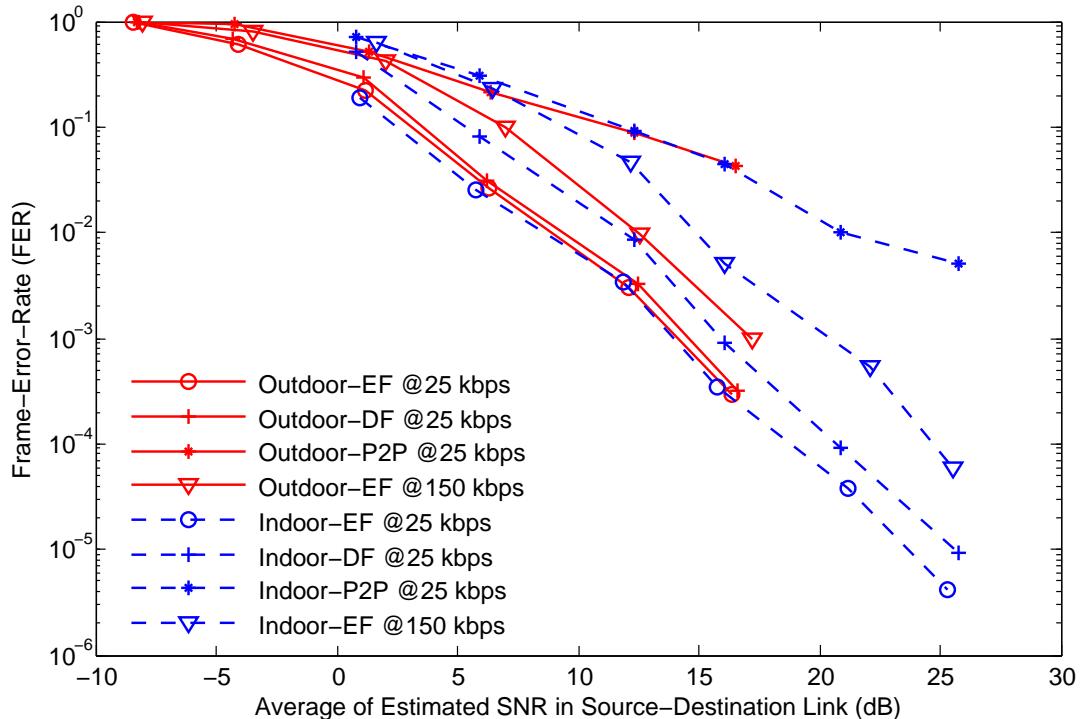
4.3. Hasil Eksperimen

Gambar. 4.12 menunjukkan hasil akhir pengukuran ACC-DTC di lapangan. Terdapat dua parameter yang diubah untuk melihat pengaruhnya terhadap hasil pengukuran, yaitu strategi kooperatif (EF, DF, dan *point-to-point* P2P) dan kecepatan simbol.

Pada tesis ini hasil yang didapat tidak dibandingkan dengan hasil simulasi. Untuk melakukannya, pertama kali harus diukur terlebih dahulu propagasi sinyal aslinya. Namun



(a) Performa BER.



(b) Performa FER.

Gambar 4.12: Performa BER dan FER ACC-DTC pengukuran langsung di lapangan.

demikian, hasil performa di lapangan dibandingkan dengan beberapa parameter yang berbeda secara relatif.

Seperti tampak pada Gambar. 4.12, jika menggunakan strategi DF dan dibandingkan dengan strategi EF pada pengukuran di indoor maka hasil yang didapat lebih buruk. Tetapi, tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada pengukuran di outdoor. Hasil ini didapat karena pada saat pengukuran banyak interaksi yang terjadi baik di link S-R link dan link R-D link di pengukuran indoor. Sedangkan pada pengukuran outdoor tidak ada interaksi yang terjadi di link S-R. Selain itu, dari segi geometrisnya, struktur fisik di indoor cenderung lebih tidak regular dibanding di outdoor [2].

Dari Gambar. 2.6 dan dibuktikan secara simulasi di [4], ACC-DTC memiliki diversity order kedua. Diversity order ditunjukkan dengan perubahan kemiringan dari BER atau FER. Dapat dilihat dari Gambar. 4.12, baik BER dan FER menunjukkan kecenderungan diversity order kedua dimana untuk kenaikan SNR sebesar 5 dB maka BER atau FER turun satu dekade.

Parameter selanjutnya yang ingin dilihat efeknya terhadap hasil pengukuran adalah kecepatan simbol. Setelah dilakukan pengukuran, hasilnya menunjukkan bahwa dengan naiknya kecepatan simbol maka performa error terdegradasi. Hasil ini juga bersesuaian dengan hasil pengukuran di [30]. Secara teoritis, dengan naiknya kecepatan simbol maka bandwidthnya semakin lebar sehingga sinyal yang dikirimkan akan mengalami fading yang tidak lebih rata (*less-flat fading effect*) [2].

4.4. Aplikasi ACC-DTC

Sebagai tambahan dalam penggerjaan ini maka ACC-DTC dikembangkan lebih jauh untuk melihat kemungkinan apakah ACC-DTC dapat dikembangkan menjadi sebuah aplikasi yang real-time. Sama seperti sebelumnya, masalah sinkronisasi transmisi S-R disederhanakan juga pada bab ini. Masalah sinkronisasi transmisi S-R banyak didiskusikan di [30, 28, 29]. Oleh karena itu, masalah yang ada kemungkinan besar adalah kecepatan proses di komputer.

Pada pengembangan aplikasi ini, digunakan karakter *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) sebagai message yang akan dikirimkan. ASCII karakter ini dapat menunjukkan secara kualitatif jika terdapat kesalahan satu bit. Hal ini berbeda jika digunakan gambar atau audio sebagai message yang dikirimkan.

Setelah dilakukan observasi secara sekilas, dideteksi bahwa penyebab delay di sistem

adalah pemrosesan sinyal yang bukan paket. Hal ini terjadi karena pada saat USRP dinyalakan sudah terdapat sinyal noise. Masalah ini menjadi masalah deteksi sinyal. Terdapat beberapa metode yang sudah diajukan untuk masalah deteksi sinyal, misalnya deteksi energi menggunakan sensing spektrum, sensing berdasarkan waveform, dan sensing berdasarkan cyclostationary, dll. [37]. Dengan alasan kemudahan, digunakan metode deteksi energi sensing spektrum pada tesis ini. Pada tesis ini, menggunakan formula masalah yang diajukan pada [61], sbb.

$$\lambda_g(\mathbf{y}) \triangleq \frac{1}{2\hat{\sigma}^2 N} \sum_{i=0}^{N-1} |y_i|^2 \stackrel{\mathcal{H}_1}{\geqslant} \stackrel{\mathcal{H}_0}{\leqslant} \xi, \quad (4.7)$$

dimana $\hat{\sigma}^2$ merupakan estimasi noise variance, N adalah jumlah sample, ξ adalah decision threshold, \mathcal{H}_1 dan \mathcal{H}_0 adalah hipotesis ada atau tidaknya sinyal. Sedangkan, estimasi noise variance $\hat{\sigma}^2$ didapat dari nilai minimum dari eigenvalue dari autokorelasi sinyal yang diterima. Nilai threshold ξ didapatkan dengan aproksimasi sbb.

$$P_{FA} \approx Q\left(\frac{\xi - 1}{1/\sqrt{N}}\right), \quad (4.8)$$

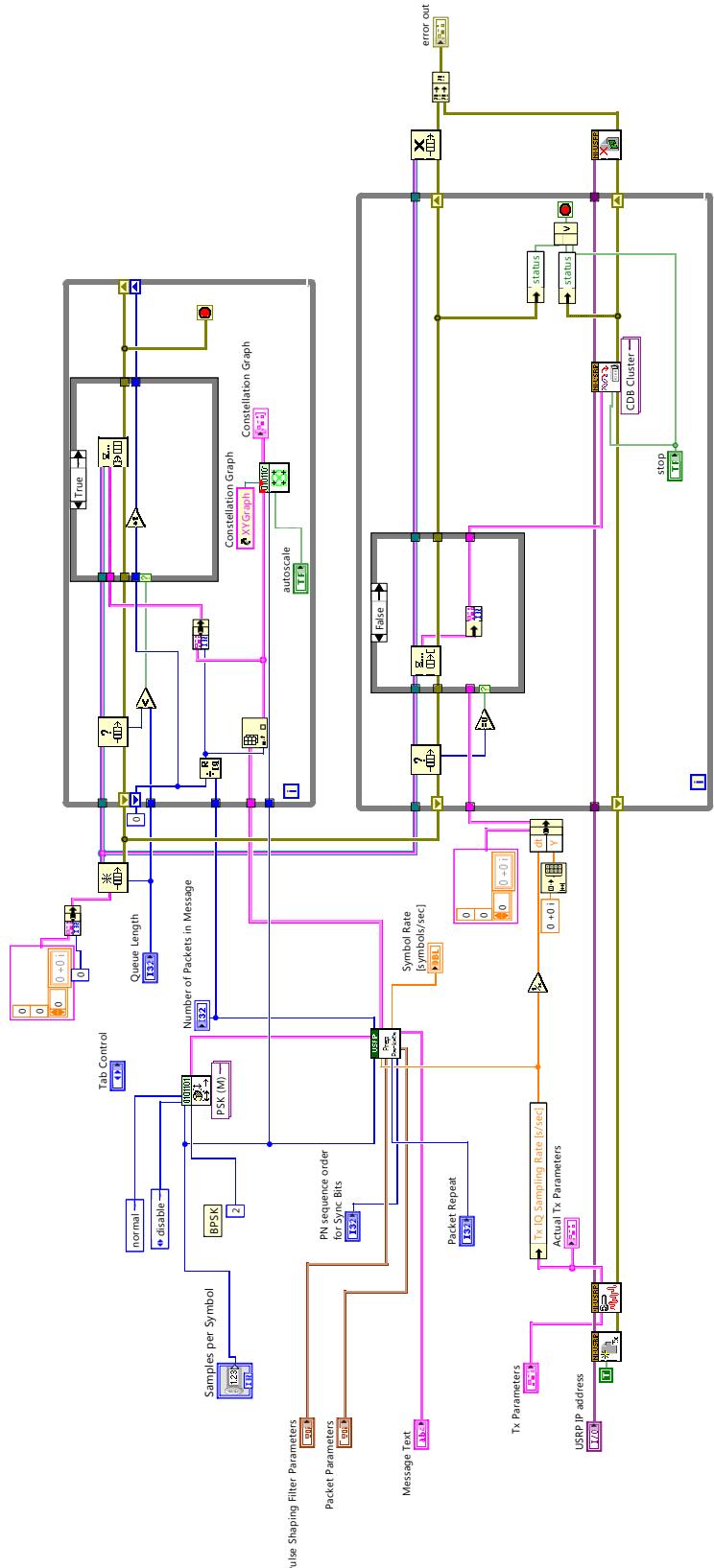
dimana peluang false-alarm dinotasikan sebagai P_{FA} . Pada tesis ini digunakan nilai $P_{FA} = 0.1$ dan $N = 10000$.

Pada tesis ini, penyederhanaan yang sudah dijelaskan sebelumnya diaplikasikan disini, yaitu menggunakan dekoder Max-Log-MAP sebagai dekoder dan penyederhanaan perhitungan estimasi korelasi S-R. Sebagai tambahan, di referensi [62], dapat digunakan optimasi dengan menerapkan guideline umum sebagai berikut

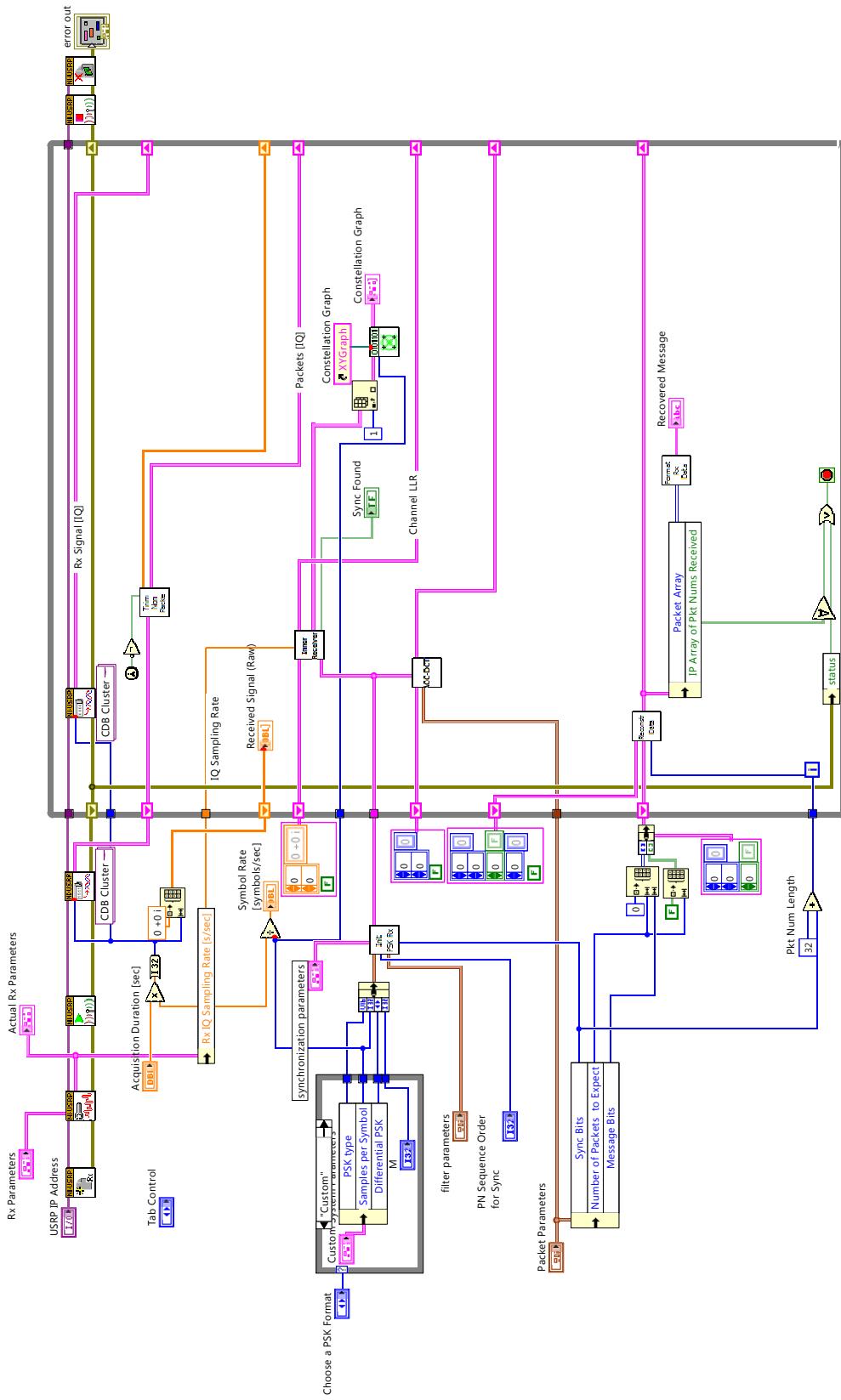
1. Efisiensi komputasi yang terdapat di dalam loop dan pre-komputasi, termasuk paralelisasinya.
2. Hindari penggunaan global variabel.
3. Sedapat mungkin menggunakan library yang sudah tersedia atau implementasi kode LabVIEW menjadi library static C.
4. Melakukan kompilasi menjadi program yang executable.
5. Optimasi algoritma.

Penyederhanaan tampilan top modul transmitter dan receiver ditunjukkan pada Gambar. 4.13 dan Gambar. 4.14. Tampilan sample *graphical-user-interface* (GUI) pada saat aplikasi ini bekerja ditunjukkan pada Gambar. 4.15.

Pada proses perancangannya, proses penyederhanaan dengan menyederhanakan masalah sinkronisasi transmisi juga dilakukan. Oleh karena itu, prosedur pengukuran diversity order ACC-DTC juga dapat diterapkan disini, lihat Gambar. 4.9. Ilustrasi yang lebih jelas mengenai demonstrasi aplikasi real-time ACC-DTC ini telah di-upload di channel YouTube NI ASEAN [63]. Dari video tersebut ditunjukkan bahwa dengan menggunakan penyederhanaan perhitungan dan optimasi kode, data yang diterima dapat diproses secara real-time (tidak ada delay secara pengamatan kualitatif). Percobaan ini diukur di outdoor, lihat Gambar. 4.1. Sistem ini telah diujicobakan di outdoor sampai kecepatan simbol 250 kbps dan hasilnya masih tidak ada delay terlihat pada proses perhitungan sinyal yang diterima.



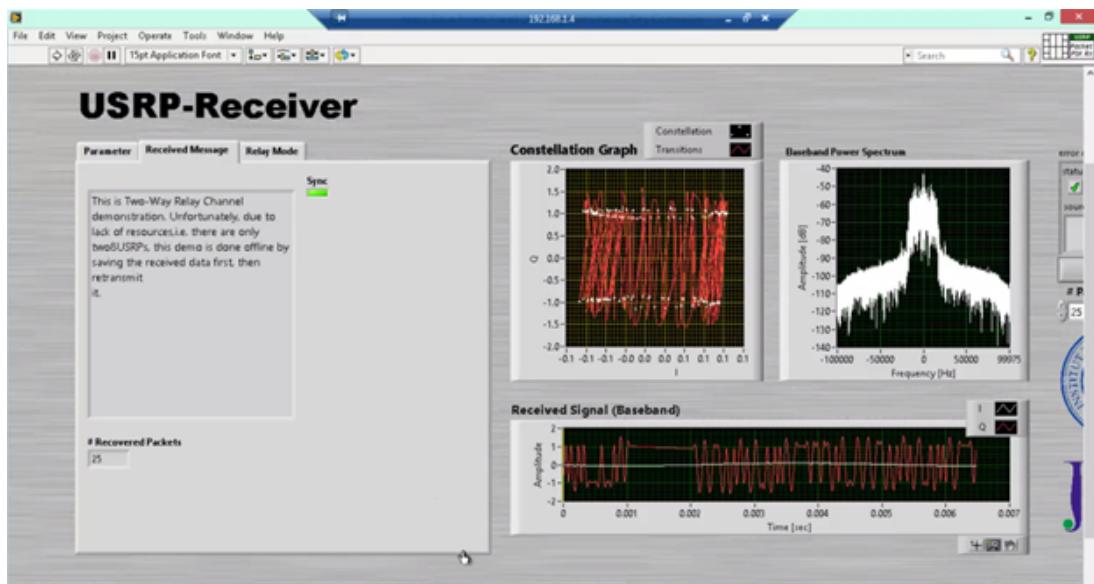
Gambar 4.13: Control panel LabVIEW untuk top modul transmitter.



Gambar 4.14: Control panel LabVIEW untuk top modul receiver.



(a) Sample front panel LabVIEW untuk transmitter.



(b) Sample front panel LabVIEW untuk receiver.

Gambar 4.15: Sample front panel LabVIEW untuk transmitter dan receiver.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

1. Dengan menggunakan 2D EXIT chart maka HI pada ACC-DTC konvergen, dengan menggunakan 3D EXIT chart dan model bit-flipping maka VI pada ACC-DTC konvergen, dan dengan menggunakan 3D EXIT chart dan melihat trajektori dekodingnya maka ACC-DTC konvergen.
2. Dengan menggunakan 3D EXIT chart, daerah turbo-cliff ACC-DTC pada kanal AWGN memberikan prediksi yang akurat jika dibandingkan dengan hasil simulasinya di referensi ACC-DTC asli [4], yaitu -2.7 dB untuk lokasi-A dan -8.1 dB untuk lokasi B.
3. Dari analisis konvergensi square error dan trajektori untuk penyederhanaan perhitungan estimas korelasi link S-R menunjukkan sifat konvergen untuk keduanya.
4. Perbandingan performa BER pada kanal AWGN dan FER pada kanal frequency-flat block-Rayleigh fading menggunakan simulasi pada lokasi-A menunjukkan gain yang tidak terlalu besar, yaitu 0.3 db untuk BER dan 0.5 dB untuk FER. Sedangkan pada lokasi-B gain yang didapat keduanya kurang dari 0.1 dB.
5. Evaluasi menggunakan eksperimen langsung di lapangan baik di indoor dan outdoor menunjukkan bahwa ACC-DTC memiliki kecenderungan diversity order kedua, dimana dengan naiknya SNR 5 dB nilai BER atau FER turun satu dekade. Hasil ini sesuai dengan kecenderungan yang didapat jika menggunakan simulasi seperti yang ditunjukkan pada referensi ACC-DTC asli [4]
6. Dengan menggunakan dua buah ACC-DTC, dilakukan penyederhanaan masalah sinkronisasi transmisi, penambahan modul deteksi energi untuk mengeliminasi sinyal bukan paket, dan dilakukan penyederhanaan perhitungan dan optimasi kode, menunjukkan bahwa ACC-DTC berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut menjadi sebuah aplikasi real-time karena tidak terdapat delay (hasil pengamatan

kualitatif) pada saat proses perhitungan terhadap sinyal yang diterima dengan kecepatan simbol sampai 250 kbps di outdoor.

5.2. Kontribusi

Tesis ini berfokus pada analisis dan evaluasi langsung dari salah satu teknik yang dikembangkan untuk komunikasi kooperatif. Teknik yang digunakan adalah ACC-DTC yang merupakan penyederhanaan realisasi dari sistem komunikasi kooperatif dengan menggunakan sistem satu relay. Berikut ini adalah ringkasan kontribusi yang telah dilakukan pada penggeraan tesis ini :

1. Analisis konvergensi ACC-DTC dengan menggunakan EXIT chart.
2. Penyederhanaan, analisis konvergensi, dan simulasi dari perhitungan estimasi korelasi antara source node dan relay node.
3. Eksperimen langsung diversity order ACC-DTC di lapangan.
4. Aplikasi ACC-DTC yang "real-time" dengan menggunakan dua USRP untuk melihat secara kualitatif apakah mungkin untuk dikembangkan lanjut menjadi satu aplikasi ACC-DTC yang utuh.

5.3. Publikasi

Beberapa bagian dari penggeraan tesis ini telah dipublikasikan, telah diajukan, dan akan diajukan, diantaranya adalah :

1. A. A. Purwita, "Error performance of single half-duplex relay system using USRP," in ASEAN Regional Contest Case Studies Booklet, 2014 NI Engineering Impact Awards. [Online]. Available: http://www.ni.com/gate/gb/GB_INFOSDAA/US
2. (2014, aug) 2014 Engineering Impact Awards ASEAN Regional : Error Performance of Single Half-Duplex Relay System using NI USRP. [Online]. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=0pSDzmfSn1s>
3. A. A. Purwita, K. Anwar, and T. Adiono, "Experimental evaluation for relaying system allowing intralink error," in *10th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding 2015 (SCC'2015)*, Hamburg, Germany, Feb. 2015, submitted for publication.

4. A. A. Purwita, K. Anwar, T. Adiono, and T. Matsumoto, "Analysis and experimental evaluations for relaying system allowing intralink errors," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, to be submitted for publication.

5.4. Saran

1. ACC-DTC dapat disederhanakan lebih lanjut hanya menggunakan 1 enkoder atau outer enkodernya menggunakan linear block code karena bentuk kurva EXITnya identik dengan kurva EXIT inner code.
2. Menggunakan sistem yang lengkap, yaitu tiga buah USRP, untuk melihat apakah kecenderungan diversity order ACC-DTC masih tampak.
3. Implementasi sinkronisasi transmisi antara source node dan relay node dan dievaluasi apakah ada efeknya terhadap kecenderungan diversity order ACC-DTC.
4. ACC-DTC dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi aplikasi real-time yang lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Zhang, H. Chen, and M. Guizani, *Cooperative Wireless Communications*, ser. Wireless Networks and Mobile Communications. Taylor & Francis, 2009.
- [2] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [3] A. M. d. Turkmani, A. Awojolu, P. A. Jefford, and C. J. Kellett, “An experimental evaluation of the performance of two-branch space and polarization diversity schemes at 1800 mhz,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 2, pp. 318–326, May 1995.
- [4] K. Anwar and T. Matsumoto, “Accumulator-assisted distributed turbo codes for relay systems exploiting source-relay correlation,” *Communications Letters, IEEE*, vol. 16, no. 7, pp. 1114–1117, 2012.
- [5] G. Kramer, M. Gastpar, and P. Gupta, “Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 9, pp. 3037–3063, 2005.
- [6] B. Zhao and M. Valenti, “Distributed turbo coded diversity for relay channel,” *Electronics Letters*, vol. 39, no. 10, pp. 786–787, 2003.
- [7] J. Garcia-Frias and Y. Zhao, “Near-shannon/slepian-wolf performance for unknown correlated sources over awgn channels,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 4, pp. 555–559, 2005.
- [8] R. Asvadi, T. Matsumoto, and M. Juntti, “Joint distributed source-channel decoding for LDPC-coded binary markov sources,” in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on*, Sept 2013, pp. 807–811.
- [9] X. Zhou, M. Cheng, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Distributed joint source-channel coding for relay systems exploiting source-relay correlation and source memory,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2012, no. 1, pp. 1–13, 2012.

- [10] P. Lu, X. Zhou, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Joint adaptive network-channel coding for energy-efficient multiple-access relaying,” *Vehicular Technology, IE-EE Transactions on*, vol. 63, no. 5, pp. 2298–2305, Jun 2014.
- [11] X. Zhou, A. O. Lim, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Distributed joint source-channel-network coding exploiting source correlation for multiple access relay channel,” in *Wireless Conference (EW), Proceedings of the 2013 19th European*. VDE, 2013, pp. 1–6.
- [12] K. Anwar and T. Matsumoto, “Iterative spatial demapping for two correlated sources over fading multiple access channel,” in *Wireless Advanced (WiAd), 2012*, June 2012, pp. 127–131.
- [13] M. Cheng, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Simple relay systems with BICM-ID allowing intra-link errors,” *IEICE transactions on communications*, vol. 95, no. 12, pp. 3671–3678, 2012.
- [14] M. Cheng, A. Irawan, K. Anwar, and T. Matsumoto, “BICM-ID for relay system allowing intra-link errors and a similarity constellation to ARQ schemes,” *Session 1P5b Distributed Coding and Cooperative Communications*, p. 155, 2012.
- [15] A. Irawan, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Combining-after-decoding turbo hybrid ARQ by utilizing doped-accumulator,” *Communications Letters, IEEE*, vol. 17, no. 6, pp. 1212–1215, June 2013.
- [16] M. Cheng, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Outage probability of a relay strategy allowing intra-link errors utilizing slepian-wolf theorem,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–12, 2013.
- [17] X. Zhou, M. Cheng, X. He, X. He, K. Anwar, T. Matsumoto, and T. Matsumoto, “Outage analysis of decode-and-forward relaying system allowing intra-link errors,” *European Wireless 2014*, 2014.
- [18] M. Cheng, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Outage based power allocation: Slepian-wolf relaying viewpoint,” in *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013 IEEE*, Dec 2013, pp. 807–811.
- [19] X. Zhou, P.-S. Lu, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Correlated sources transmission in orthogonal multiple access relay channel: Theoretical analysis and performance evaluation,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 3, pp. 1424–1435, March 2014.

- [20] X. He, X. Zhou, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Estimation of observation error probability in wireless sensor networks,” *Communications Letters, IEEE*, vol. 17, no. 6, pp. 1073–1076, June 2013.
- [21] H. Xin, K. Anwar, and T. Matsumoto, “GREAT-CEO: larGe scale distRibuted dEcision mAking Techniques for wireless Chief Executive Officer problems,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. 95, no. 12, pp. 3654–3662, 2012.
- [22] X. He, X. Zhou, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Wireless mesh networks allowing intra-link errors: CEO problem viewpoint,” in *Information Theory and its Applications (ISITA), 2012 International Symposium on*, Oct 2012, pp. 61–65.
- [23] K. Anwar and T. Matsumoto, “Field measurement data-based performance evaluation for slepian-wolf relaying systems,” *Electronics, Information and Communication Engineers Conference Proceedings*, 2013.
- [24] S. Ten Brink, “Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 10, pp. 1727–1737, 2001.
- [25] F. Daneshgaran, M. Laddomada, and M. Mondin, “Iterative joint channel decoding of correlated sources employing serially concatenated convolutional codes,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 7, pp. 2721–2731, July 2005.
- [26] K. Zheng, L. Huang, G. Li, H. Cao, W. Wang, and M. Dohler, “Beyond 3G evolution,” *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol. 3, no. 2, pp. 30–36, June 2008.
- [27] M. Miyagoshi, H. Murata, S. Yoshida, K. Yamamoto, D. Umehara, S. Denno, and M. Morikura, “Experimental verification of per performance of stbc-based multi-hop cooperative relaying,” in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*, Sept 2012, pp. 1–4.
- [28] P. Murphy, “Design, implementation and characterization of a cooperative communications system,” Ph.D. dissertation, Rice University, 2010. [Online]. Available: <http://warp.rice.edu/w/MurphyPhDThesis>
- [29] P. Murphy and A. Sabharwal, “Design, implementation, and characterization of a cooperative communications system,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 6, pp. 2534–2544, July 2011.

- [30] J. Zhang, J. Jia, Q. Zhang, and E. Lo, “Implementation and evaluation of cooperative communication schemes in software-defined radio testbed,” in *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, March 2010, pp. 1–9.
- [31] G. Bradford and J. Laneman, “An experimental framework for the evaluation of cooperative diversity,” in *Information Sciences and Systems, 2009. CISS 2009. 43rd Annual Conference on*, March 2009, pp. 641–645.
- [32] J. Mitola, “The software radio architecture,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 33, no. 5, pp. 26–38, May 1995.
- [33] (2014, jul) LabVIEW System Design Software. [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/>
- [34] (2014, jul) NI USRP-2920, 50 MHz to 2.2 GHz Software Radio. [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/209948>
- [35] (2014, jul) Harvest RH-779 dual band telescopic VHF/UHF Dual-band Antenna (SMA-S). [Online]. Available: <http://www.amazon.com/Harvest-RH-779-telescopic-Dualband-Antenna/dp/B00CGO2W9A>
- [36] S. Caban, J. Garcia Naya, and M. Rupp, “Measuring the physical layer performance of wireless communication systems: Part 33 in a series of tutorials on instrumentation and measurement,” *Instrumentation Measurement Magazine, IEEE*, vol. 14, no. 5, pp. 8–17, October 2011.
- [37] T. Yucek and H. Arslan, “A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications,” *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, First 2009.
- [38] M. Valkama, J. Pirskanen, and M. Renfors, “Signal processing challenges for applying software radio principles in future wireless terminals: an overview,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 15, no. 8, pp. 741–769, 2002.
- [39] P. Handel and P. Zetterberg, “Receiver I/Q imbalance: Tone test, sensitivity analysis, and the universal software radio peripheral,” *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 3, pp. 704–714, March 2010.
- [40] H. Meyr, M. Moeneclaey, and S. Fechtel, *Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

- [41] D. Pauluzzi and N. Beaulieu, “A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 10, pp. 1681–1691, Oct 2000.
- [42] A. Wiesel, J. Goldberg, and H. Messer-Yaron, “SNR estimation in time-varying fading channels,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 5, pp. 841–848, May 2006.
- [43] G. Battail, M. Decouvelaere, and P. Godlewski, “Replication decoding,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 3, pp. 332–345, May 1979.
- [44] P. Robertson, “Illuminating the structure of code and decoder of parallel concatenated recursive systematic (turbo) codes,” in *Global Telecommunications Conference, 1994. GLOBECOM '94. Communications: The Global Bridge., IEEE*, vol. 3, nov- 2 dec 1994, pp. 1298 –1303 vol.3.
- [45] L. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, “Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate (corresp.),” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 2, pp. 284–287, 1974.
- [46] J. Erfanian, S. Pasupathy, and G. Gulak, “Reduced complexity symbol detectors with parallel structure for isi channels,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 234, pp. 1661 –1671, feb/mar/apr 1994.
- [47] S. Ten Brink, “Code doping for triggering iterative decoding convergence,” in *Information Theory, 2001. Proceedings. 2001 IEEE International Symposium on*, 2001, pp. 235–.
- [48] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, “Near shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. 1,” in *Communications, 1993. ICC 93. Geneva. Technical Program, Conference Record, IEEE International Conference on*, vol. 2, may 1993, pp. 1064 –1070 vol.2.
- [49] S. Pfletschinger and F. Sanzi, “Error floor removal for bit-interleaved coded modulation with iterative detection,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 11, pp. 3174–3181, 2006.
- [50] R. Youssef and A. Graell i Amat, “Distributed serially concatenated codes for multi-source cooperative relay networks,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 1, pp. 253–263, 2011.

- [51] M. Cheng, K. Anwar, and T. Matsumoto, “Outage analysis of correlated source transmission in block rayleigh fading channels,” in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*, 2012, pp. 1–5.
- [52] C. Shannon, “A mathematical theory of communication,” *Bell System Technical Journal, The*, vol. 27, no. 3, pp. 379–423, July 1948.
- [53] S. Brink, “Code characteristic matching for iterative decoding of serially concatenated codes,” *Annales Des Télécommunications*, vol. 56, no. 7-8, pp. 394–408, 2001.
- [54] F. Brannstrom, L. Rasmussen, and A. Grant, “Convergence analysis and optimal scheduling for multiple concatenated codes,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 9, pp. 3354–3364, Sept 2005.
- [55] (2014, jul) NI USRP-2920 Block Diagram. [Online]. Available: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373380A-01/usrphelp/2920_block_diagram/
- [56] (2007, jan) Sources of Error in IQ Based RF Signal Generation. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/5657/en/>
- [57] (2014, jul) NI-USRP 1.2 - Windows 7 64-bit/7 32-bit/Vista 64-bit/Vista 32-bit/XP (SP2) 32-bit. [Online]. Available: <http://www.ni.com/download/ni-usrp-1.2/3696/en/>
- [58] (2014, jul) LabVIEW Modulation Toolkit 4.3.3. [Online]. Available: <http://www.ni.com/download/ni-modulation-toolkit-4.3.3/2842/en/>
- [59] (2014, jul) Tools for Digital and Analog Modulation/Demodulation Communications Analysis. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/products/us/032753305101.pdf>
- [60] S. Nowlan and G. Hinton, “A soft decision-directed LMS algorithm for blind equalization,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 2, pp. 275–279, Feb 1993.
- [61] A. Mariani, A. Giorgetti, and M. Chiani, “Effects of noise power estimation on energy detection for cognitive radio applications,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 12, pp. 3410–3420, December 2011.
- [62] C. Clark, *Labview Digital Signal Processing*. McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2005.

[63] (2014, aug) 2014 Engineering Impact Awards ASEAN Regional : Error Performance of Single Half-Duplex Relay System using NI USRP. [Online]. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=0pSDzmfSn1s>