

Evaluasi Metode Penginderaan Spektrum Kooperatif Berbasis Deteksi Energi pada Teknik Radio Kognitif

Ahmad Fakhruddin Ashari¹, Izzun Nafis I¹, D. Dony Ariananda², Wahyu Dewanto²

Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi,
Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Yogyakarta, Indonesia

¹{ahmadfakhruddin, izzunnafis2018}@mail.ugm.ac.id, ²{dyonisius.dony, wahyud}@ugm.ac.id

Abstract—Opportunistic spectrum access (OSA) in cognitive radio (CR) must conduct a spectrum sensing stage to examine the activity status of primary users (PUs) in the spectrum. Cooperative spectrum sensing (CSS) is a technique that can be exploited to minimize the effect of hidden terminals as we have multiple CRs or secondary users (SUs) and they are sparsely located. In this paper, the performance of energy detection-based CSS is considered. The CSS process is configured to ensure that the probability of detection is higher than 0.9 and the probability of false alarm is lower than 0.1 as required by the IEEE 802.22 standard. CSS can be conducted in a centralized or distributed fashion. Our study has shown that, using the averaging method, the IEEE standard can be satisfied by collecting ten thousand samples and having fifteen SUs. The threshold required in the energy detection stage to achieve the probability of detection of 0.1 is 1.0047 times the noise power at SUs.

Intisari—Opportunistic spectrum access (OSA) pada cognitive radio (CR) memerlukan tahapan penginderaan spektrum untuk memastikan keberadaan PU (Primary User) dalam spektrum. Cooperative spectrum sensing (CSS) merupakan teknik yang diperlukan dalam meminimalkan dampak efek *hidden terminal* karena jumlah CR atau SU (Secondary User) yang jamak dan tersebar lokasinya. Dalam makalah ini, ditinjau performa metode CSS dengan deteksi energi. Proses CSS diatur agar dapat mencapai probabilitas deteksi di atas 0.9 dan *probability of false alarm* di bawah 0.1 sesuai standar IEEE 802.22. CSS dapat dilakukan secara *centralized* dan *distributed*. Dengan menggunakan metode rerata, standar IEEE terpenuhi dengan sepuluh ribu sampel dan lima belas SU. Nilai *threshold* pada deteksi energi untuk mencapai *probability of false alarm* di angka 0.1 adalah 1.0047 kali daya derau pada SU.

Kata kunci—*centralized, cognitive radio, consensus, cooperative, distributed, energy detection, spectrum sensing.*

I. PENDAHULUAN

Penggunaan pita frekuensi yang statis menyebabkan pemanfaatan pita frekuensi yang tidak maksimal [1]. Pita frekuensi seharusnya dapat digunakan secara maksimal untuk memfasilitasi proses komunikasi yang terjadi setiap waktu dan pada lokasi manapun. Untuk memaksimalkan penggunaan pita frekuensi, muncul paradigma *dynamic spectrum access* (DSA). Dalam DSA, suatu pita frekuensi yang telah terlisensi dapat digunakan juga oleh pengguna yang tidak terlisensi [2]. DSA merupakan bagian penting dalam

teknik radio kognitif atau *cognitive radio* (CR), yang merupakan radio cerdas dengan kemampuan beradaptasi terhadap perubahan kondisi spektrum serta secara cerdas memanfaatkan spektrum [3]. Konsep *opportunistic spectrum access* (OSA) merupakan salah satu jenis DSA di mana penggunaan spektrum terlisensi oleh pengguna tak berlisensi (pengguna tak resmi) atau *secondary user* (SU) dimungkinkan saat pengguna terlisensi atau *primary user* (PU) tidak aktif. Untuk dapat menggunakan spektrum dengan mengacu pada konsep OSA, perlu dilakukan penginderaan spektrum atau *spectrum sensing* (SS) guna memastikan tidak adanya PU dalam suatu spektrum. Dalam konsep CR, SU inilah yang berperan sebagai radio cerdas (CR) dan diharapkan proses komunikasi PU maupun SU tetap *reliable* di mana pun dan kapan pun [3].

Deteksi energi atau *energy detection* (ED) merupakan metode SS yang tidak membutuhkan informasi terkait karakteristik isyarat PU dalam spektrum [4]. Metode ED cukup memanfaatkan hasil pengukuran energi spektrum untuk menentukan ada tidaknya PU. Pita frekuensi yang diukur energi spektrumnya disebut dengan *band of interest*.

Permasalahan *hidden terminal* merupakan salah satu tantangan dalam proses SS oleh CR yang dapat menyebabkan kegagalan dalam deteksi keberadaan PU oleh SU. Penyebab dari permasalahan tersebut adalah terlalu jauhnya jarak antara pemancar PU dengan SU atau adanya penghalang antara pemancar PU dengan SU. Cooperative spectrum sensing (CSS) adalah metode SS yang dilakukan secara bersama-sama oleh beberapa SU dalam suatu jaringan CR. Pada CSS, tiap SU pada jaringan CR diasumsikan memiliki kualitas penerimaan isyarat relatif berbeda dan SU-SU tersebut melakukan kerja sama dengan berbagi informasi hasil proses SS yang dilakukan. Metode ini bertujuan untuk memitigasi dampak terjadinya fenomena *hidden terminal* serta meningkatkan akurasi SS. Tercapainya dua tujuan tersebut dapat memaksimalkan penggunaan spektrum [5].

Makalah ini meninjau CSS berbasis ED untuk kanal *narrowband* dengan sebuah PU untuk mempermudah asumsi konten informasi kooperatif. CSS dalam arsitektur *centralized* maupun *distributed* dievaluasi. Pemodelan sistem CSS dalam simulasi dijelaskan pada Bagian II yang meliputi model penerimaan isyarat dan kanal penginderaan. Bagian III membahas CSS secara *centralized* yang menghasilkan metode *fusion* paling

akurat untuk skenario yang digunakan. Metode *fusion* merupakan metode kombinasi hasil proses SS untuk menghasilkan keputusan secara kooperatif. Bagian IV membahas mengenai CSS secara *distributed* yang juga menghasilkan metode *fusion* dengan akurasi tertinggi. Kanal *sensing* atau kanal nirkabel penerimaan isyarat pada SU pada Bab 3 dan 4 adalah kanal AWGN (*additive white Gaussian noise*). Pada Bab 5 diuraikan perancangan spesifikasi CSS untuk arsitektur *centralized* dan *distributed* agar memenuhi standar IEEE 802.22. Sistem CSS harus memiliki probabilitas deteksi atau *probability of detection* (P_D) minimal 0.9 dan nilai *probability of false alarm* (P_{FA}) maksimal 0.1 pada SNR (*signal-to-noise ratio*) serendah -20 dB. Nilai P_D dan P_{FA} divisualisasikan dalam kurva *receiver operating characteristic* (ROC) [2]. Nilai P_D dan P_{FA} pada kurva ROC diestimasi melalui simulasi stokastik. Statistik dari simulasi yang diulang-ulang menggambarkan estimasi bagi P_D dan P_{FA} sesungguhnya [6]. Hasil perancangan diuji pada variasi kanal *sensing* yang mencakup kanal AWGN, *Rayleigh flat fading*, dan *Rayleigh frequency-selective fading*. Kesimpulan dari makalah ini termuat pada Bab 6.

II. PEMODELAN SISTEM DAN KANAL KOMUNIKASI

A. Energy Detection (ED) pada Secondary Users (SU)

Metode ED merupakan metode SS yang berbasiskan pada uji *hypothesis* terhadap pengukuran energi (Λ) pada *band of interest* sebagai *test statistics*. Ada tidaknya PU pada *band of interest* merupakan hal yang sejatinya tidak diketahui oleh SU. Diformulasikan *null hypothesis* (\mathcal{H}_0) yang merupakan keadaan tidak ada PU dalam *band of interest* dan *alternative hypothesis* (\mathcal{H}_1) untuk keadaan adanya PU dalam *band of interest*. Berdasarkan kedua *hypothesis* tersebut, *lowpass equivalent* dari isyarat dengan spektrum pada *band of interest* yang dinotasikan sebagai $y[n]$ dapat tersusun atas dua kemungkinan seperti persamaan berikut [4], [7]

$$y[n] = \begin{cases} \mathcal{H}_0: w[n], \\ \mathcal{H}_1: r[n] + w[n], \end{cases} \quad (1)$$

dengan $w[n]$ adalah derau dan $r[n]$ adalah isyarat dari PU yang diterima. Hasil pengukuran energi dirumuskan sebagai jumlah kuadrat dari *magnitude* tiap sampel $y[n]$ yang ternormalisasi seperti diekspresikan berikut

$$\Lambda = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |y[n]|^2. \quad (2)$$

SU memutuskan \mathcal{H}_0 atau \mathcal{H}_1 berbasiskan proses *thresholding* terhadap nilai Λ dengan suatu *threshold* λ . Dalam kaitannya dengan *thresholding*, permasalahan ED berubah menjadi permasalahan *binary hypothesis testing* untuk \mathcal{H}_0 dan \mathcal{H}_1

$$D_{SU} = \begin{cases} \mathcal{H}_1, & \Lambda > \lambda \\ \mathcal{H}_0, & \Lambda \leq \lambda \end{cases} \quad (3)$$

Kondisi \mathcal{H}_0 merupakan kondisi murni acak yang dipengaruhi oleh peubah acak. Derau $w[n]$ didefinisikan sebagai *Gaussian white noise* dengan mean nol dan

variansi sebesar σ_w^2 seperti berikut ini

$$w[n] \sim \mathcal{N}(0, \sigma_w^2). \quad (4)$$

Derau $w[n]$ dihasilkan oleh proses stasioner yang memiliki properti statistik konstan terhadap waktu. Dengan demikian, nilai SNR pada SU dapat dirumuskan sebagai daya ternormalisasi dari isyarat $r[n]$ dibagi dengan varians derau

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |r[n]|^2 / \sigma_w^2, \quad \gamma_{dB} = 10 \log(\gamma). \quad (5)$$

Dengan diketahuinya statistik derau, hasil pengukuran energi sebagai *test statistics* dapat dimodelkan distribusinya. Berdasarkan (1), (2), dan fakta bahwa jumlah kuadrat dari peubah acak *Gaussian* terdistribusi *chi-square* (χ^2) [8], maka distribusi Λ untuk \mathcal{H}_0 adalah sebagai berikut

$$\Lambda_{\mathcal{H}_0} \sim \chi_N^2 \cdot \frac{\sigma_w^2}{N} \quad (6)$$

Dalam proses SS berbasiskan ED, P_{FA} dan P_D diekspresikan sebagai *conditional probability* berikut ini

$$\begin{aligned} P_{FA} &= \Pr(\mathcal{H}_1 | \mathcal{H}_0) = \Pr(\Lambda > \lambda | \mathcal{H}_0), \\ P_D &= \Pr(\mathcal{H}_1 | \mathcal{H}_1) = \Pr(\Lambda > \lambda | \mathcal{H}_1). \end{aligned} \quad (7)$$

Perhatikan bahwa isyarat $r[n]$ merupakan isyarat PU $x[n]$ yang telah mengalami perubahan selama propagasi dalam kanal nirkabel. Dengan mendefinisikan tanggapan impuls kanal nirkabel sebagai $h_{wl}[n]$, maka kita dapat menuliskan

$$r[n] = h_{wl}[n] * x[n]. \quad (8)$$

Di sini, kanal nirkabel diasumsikan sebagai sistem *linear time invariant* (LTI). Asumsi ini ditandai dengan keberadaan operasi konvolusi pada (8). Pada (8), isyarat $x[n]$ diasumsikan sebagai peubah acak *Gaussian* standar.

B. Kanal AWGN

Kanal AWGN merupakan kanal yang mempertimbangkan efek *path loss* dan derau aditif. Derau aditif telah termuat dalam $w[n]$ dan efek *path loss* direpresentasikan sebagai berikut

$$h_{wl} = \alpha_{pl}, \quad 0 < \alpha_{pl} < 1. \quad (9)$$

Dalam model kanal AWGN, h_{wl} merupakan sebuah skalar dan bukan respon impuls. Dengan demikian, $r[n]$ dihasilkan melalui perkalian biasa antara α_{pl} dengan $x[n]$ seperti berikut

$$r[n] = \alpha_{pl} \cdot x[n] \quad (10)$$

Dengan demikian, nilai SNR untuk kanal AWGN adalah sebagai berikut

$$\gamma = \frac{\alpha_{pl}^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2}{\sigma_w^2}. \quad (11)$$

Berhubung $x[n]$ adalah peubah acak, maka persamaan SNR untuk kanal AWGN dapat ditulis sebagai berikut

$$\gamma = \alpha_{pl}^2 \cdot \sigma_x^2 / \sigma_w^2 \quad (12)$$

C. Kanal Rayleigh Fading

Kanal *Rayleigh fading* dimodelkan sebagai sistem diskrit yang tiap respon impulsnya adalah acak mengikuti

densitas Rayleigh. Variabel acak Rayleigh merupakan *magnitude* dari peubah acak Gaussian kompleks dengan mean nol [8], [9]. Peubah acak kompleks normal dinotasikan dengan $\mathcal{CN}(\mu, \sigma^2)$ di mana μ adalah *mean* dan σ^2 adalah variansi. Dalam pemodelan *Rayleigh fading* ini, tiap respon impuls memiliki distribusi sebagai berikut

$$h_{wl}[n] \sim \mathcal{CN}(0, \alpha_{pl}^2/L), \quad 0 \leq n < L-1 \quad (13)$$

Tiap respon impuls merupakan peubah acak normal kompleks dengan mean nol dan variansi sebesar kuadrat konstanta *path loss* (α_{pl}) dibagi jumlah respon impuls (L). Respon impuls yang merupakan nilai acak kompleks memberikan efek geser fase pada masukan. Saat L bernilai lebih dari satu, kanal disebut dengan *Rayleigh frequency-selective fading* karena kanal memiliki respon frekuensi yang berbeda-beda untuk tiap frekuensi.

Isyarat yang diterima oleh penerima merupakan hasil konvolusi respon impuls kanal Rayleigh dengan isyarat PU $x[n]$ seperti berikut ini

$$r[n] = \sum_{l=0}^{L-1} h_{wl}[l] \cdot x[n-l]. \quad (14)$$

Persamaan SNR untuk isyarat PU dengan kanal *Rayleigh fading* yang diterima SU adalah sebagai berikut

$$\gamma = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left| \sum_{l=0}^{L-1} h_{wl}[l] \cdot x[n-l] \right|^2}{\sigma_w^2}. \quad (15)$$

Kanal *Rayleigh fading* yang hanya memiliki satu buah respon impuls dinamakan *Rayleigh flat fading*. Pada realitanya, sebuah respon impuls tersebut merupakan beberapa respon impuls yang sangat berdekatan sehingga dapat dianggap sebagai satu impuls saja. Respon frekuensi dari *Rayleigh flat fading* adalah seragam pada semua frekuensi pada *band of interest*. Berikut adalah persamaan distribusi respon impuls dari kanal *Rayleigh flat fading*

$$h_{wl} \sim \mathcal{CN}(0, \alpha_{pl}^2). \quad (16)$$

Dengan respon impuls yang hanya berjumlah satu, operasi konvolusi menjadi operasi perkalian biasa seperti ditunjukkan pada persamaan berikut

$$r[n] = h_{wl} \cdot x[n]. \quad (17)$$

Persamaan SNR untuk isyarat diterima pada kanal *Rayleigh flat fading* dapat dituliskan sebagai berikut

$$\gamma \sim \frac{|\mathcal{CN}(0, \alpha_{pl}^2)|^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2}{\sigma_w^2}. \quad (18)$$

Nilai SNR untuk kanal *Rayleigh frequency-selective fading* dan *Rayleigh flat fading* adalah tidak selalu sama untuk tiap percobaan karena proses acak. Didefinisikan rerata SNR sebagai *expected value* dari SNR

$$\bar{\gamma} \triangleq E[\gamma]. \quad (19)$$

Model kanal *Rayleigh fading* merupakan kanal *slow fading* di mana respon impuls adalah tidak berubah dalam satu durasi pengamatan.

D. Ragam SNR

Tiap SU dimodelkan guna memiliki lokasi dan kualitas penerimaan isyarat yang beragam. Keragaman tersebut dimodelkan dalam kondisi SNR yang bervariasi. Digunakan peubah acak terdistribusi normal di ranah logaritmik (*log10 normal distribution*). Pada pengujian CSS pada bagian selanjutnya, didefinisikan rerata dan variansi SNR dalam dB.

III. CENTRALIZED CSS

Centralized CSS atau CCSS adalah istilah untuk CSS yang melakukan pengolahan informasi secara terpusat. Piranti pusat pengolahan informasi disebut dengan *fusion center* (FC). Tiap SU melakukan proses ED secara terkoordinir. Informasi hasil ED dilaporkan kepada FC melalui *reporting channel*. FC memroses informasi yang diterima dan memutuskan hasil akhir terkait keberadaan PU dalam *band of interest*. Informasi hasil ED yang dilaporkan oleh SU dapat berupa nilai pengukuran energi atau hanya sekadar informasi biner. Untuk pembahasan CCSS, *reporting channel* ditinjau pada keadaan tanpa galat dan pada kondisi dengan galat (*erroneous*). Kanal *reporting* dengan galat disebut dengan *imperfect reporting channel*.

A. Imperfect Reporting Channel Modelling

Imperfect reporting channel merupakan kondisi kanal *reporting* yang mengalami galat dan tidak handal. Kanal tersebut memberikan galat pada informasi yang dikirimkan oleh SU ke FC. Model *imperfect reporting channel* bergantung pada jenis informasi yang digunakan untuk CCSS. Saat informasi berupa nilai pengukuran energi, maka kanal memberikan perubahan nilai secara acak pada informasi yang dikirimkan [10]. Perubahan nilai dapat dimodelkan dengan derau aditif Gaussian dengan variansi sebesar P_e dikalikan dengan nilai informasi pengukuran energi. Persamaan luaran *imperfect reporting channel* y_{rep} untuk masukan x_{rep} adalah sebagai berikut

$$y_{rep} = x_{rep} + \sqrt{P_e \cdot x_{rep}} \cdot \mathcal{N}(0,1). \quad (20)$$

Saat informasi berupa keputusan (*decision*) pada CCSS, kanal *imperfect reporting channel* dimodelkan sebagai *binary symmetric channel* (BSC). Masukan kanal BSC adalah berupa informasi biner dan kanal BSC dapat merubah informasi biner masukan menjadi lawannya [11]. Perubahan informasi mengikuti suatu nilai probabilitas P_e . Misalnya untuk masukan kanal bernilai 1, luaran memiliki kemungkinan sebesar P_e untuk bernilai 0.

B. Soft Combining

Soft combining atau *data fusion* merupakan istilah untuk CCSS yang menggunakan informasi pengukuran energi sebagai bahan olah FC [5]. Dalam metode *soft combining*, teknik yang ditinjau untuk CSS dengan *blind detection* ini adalah *equal gain combining* (EGC). Metode EGC mererata *test statistic* atau pengukuran energi dari tiap SU seperti persamaan berikut [12]

$$\Lambda_{EGC} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \Lambda_m. \quad (21)$$

Keputusan FC pada EGC adalah sebagai berikut

$$D_{FC}^{EGC} = \begin{cases} 1, & \text{if } \Lambda_{EGC} > \lambda, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (22)$$

C. Hard Combining

Hard combining atau *decision fusion* merupakan skema CCSS yang menggunakan informasi biner hasil keputusan SS tiap SU sebagai bahan olah FC [5]. Informasi biner tiap SU merupakan hasil *hypothesis testing* dari pengukuran energi pada *band of interest* yang dilakukan oleh SU. Tiap SU dapat memiliki hasil *hypothesis testing* yang berbeda. FC mengolah informasi dari SU dan menghitung jumlah SU yang menyatakan mendeteksi PU. Jumlah SU yang mendeklarasikan telah mendeteksi PU pada FC ditampung pada variabel *Vote*. Metode *hard combining* menggunakan logika dasar untuk mengolah informasi dari SU.

$$\begin{aligned} D_{FC}^{AND} &= \begin{cases} 1, & \text{if } \text{Vote} = M, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \\ D_{FC}^{Major} &= \begin{cases} 1, & \text{if } \text{Vote} > M/2, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \\ D_{FC}^{OR} &= \begin{cases} 1, & \text{if } \text{Vote} > 0, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

D. Estimasi Performa CCSS

Performa proses SS dari CCSS ditentukan oleh keputusan FC terhadap kondisi sesungguhnya. Berikut adalah definisi dari P_D dan P_{FA} untuk CCSS

$$\begin{aligned} P_{FA} &= \Pr(D_{FC} = 1 | \mathcal{H}0), \\ P_D &= \Pr(D_{FC} = 1 | \mathcal{H}1). \end{aligned} \quad (24)$$

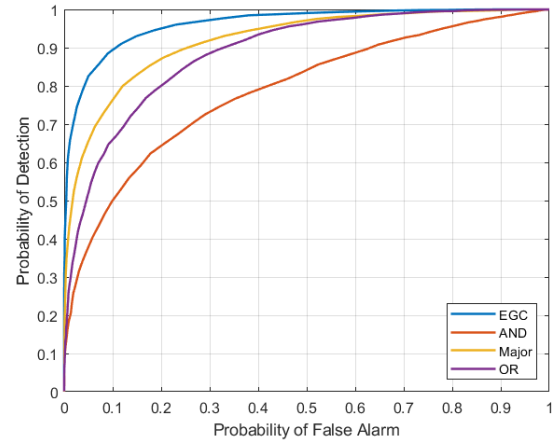
E. Pengujian CCSS pada Perfect Reporting Channel

Pengujian CCSS pada *perfect reporting channel* berguna untuk menentukan seberapa penurunan performa CCSS saat isyarat yang diterima adalah tidak pasti tetapi komunikasi antar SU dijamin handal dan bebas galat. Simulasi CCSS dilakukan dengan $M = 10$ SU, $N = 10000$ sampel, rerata SNR -20 dB, dan variansi SNR 7 dB. Kanal AWGN merupakan kanal tanpa faktor acak pada isyarat PU yang diterima SU. Metode *fusion* yang terbaik berdasarkan pengujian ini adalah metode EGC.

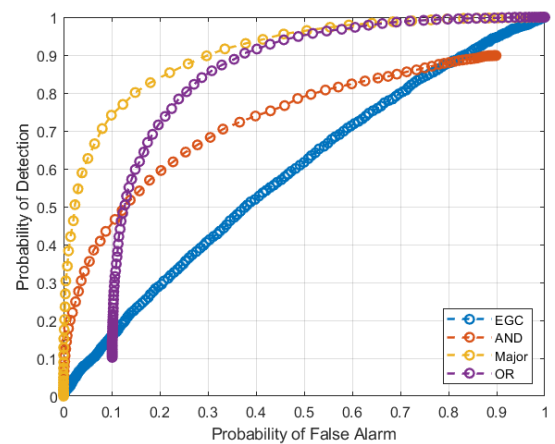
F. Pengujian CCSS pada Imperfect Reporting Channel

Pengujian *imperfect reporting channel* pada CCSS dilakukan dengan pengaturan SNR, jumlah SU, dan jumlah sampel yang sama dengan pengujian *perfect reporting channel*. Pengujian *imperfect reporting channel* menggunakan P_e sebesar 0.01. *Imperfect reporting channel* memberikan pengaruh yang cukup berarti untuk *AND-rule*, *OR-rule*, dan EGC. *AND-rule* memerlukan seluruh informasi *decision* dari SU yang sampai ke FC bernilai satu agar dapat memutuskan $\mathcal{H}1$. Sebaliknya, *OR-rule* pada FC tidak dapat menyatakan $\mathcal{H}0$ jika tidak semua informasi yang masuk bernilai nol. Kanal BSC membuat kesamaan *decision* yang diterima FC sulit tercapai. Metode *Majority-rule* merupakan metode *hard combining* yang tidak terlalu terpengaruh dengan kanal BSC karena tidak memerlukan kesamaan *decision* pada

FC. Dalam kondisi tidak optimal semacam *imperfect reporting channel*, metode *fusion* pada CCSS yang paling aman adalah *Majority-rule*.



Gambar 1. Kurva ROC CCSS dengan *perfect reporting channel* untuk kanal AWGN.



Gambar 2. Kurva ROC CCSS dengan *imperfect reporting channel* pada kanal AWGN dengan $P_e = 0.01$.

IV. DISTRIBUTED CSS

Distributed CSS (DCSS) merupakan metode pengolahan informasi SS secara terdistribusi untuk menghasilkan keputusan CSS. Berbeda dengan CCSS di mana keputusan untuk tiap SU adalah seragam dan diputuskan oleh FC, keseragaman keputusan untuk DCSS dicapai melalui pertukaran informasi antar SU.

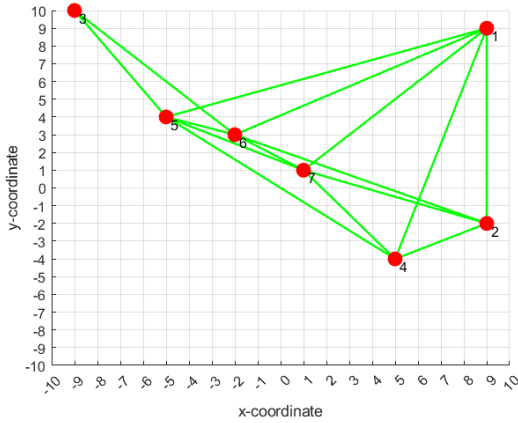
A. Graph

DCSS menggunakan graf sebagai model dari keterhubungan antar SU [13]. Tiap SU dianggap sebagai *node* atau *vertices* dan hubungan antar *node* disebut dengan *edge*. Diasumsikan terdapat *graph* G dengan himpunan *vertices* V dan himpunan *edge* \mathcal{E} [14]. Himpunan *vertices* V berisi *node-node* yang ada dalam *graph*. Himpunan *edge* \mathcal{E} merupakan himpunan yang berisi himpunan pasangan *vertices*. Lalu, didefinisikan himpunan *neighbour* yang berisi *node-node* yang terhubung dengan suatu *node*. Himpunan *neighbour* dari *node-q* (\mathcal{N}_q) berisi *node-node* anggota himpunan *vertices* yang tergabung bersama *node-q* sebagai pasangan dalam himpunan *edge* \mathcal{E} . Himpunan *edge* \mathcal{E} dapat

direpresentasikan dalam *adjacency matrix* A yang didefinisikan sebagai berikut

$$A_{qr} = \begin{cases} 1, & \text{if } r \in \mathcal{N}_q, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (25)$$

Variabel q pada persamaan di atas menunjukkan baris dan r menunjukkan kolom pada matriks. Jumlah tetangga atau *degree* yang dimiliki suatu *node-q* dituliskan dalam $|\mathcal{N}_q|$. Dalam dokumen ini, jumlah SU direpresentasikan dalam M . Untuk DCSS, M merupakan jumlah anggota himpunan *vertices* V . Jenis *graph* yang ditinjau dalam pengujian ini adalah *undirected graph* yang mana tiap *node* yang terhubung adalah secara dua arah.



Gambar 3. Fixed Graph untuk pengujian DCSS.

B. Random Graph Modelling

Skenario dalam pengujian DCSS adalah *random link failure*. Skenario *random link failure* merupakan skenario terjadinya galat komunikasi antar SU yang pada awalnya terhubung [13]. Galat tersebut menyebabkan informasi gagal tersampaikan. Galat dapat dimodelkan sebagai hilangnya *edge* dalam himpunan *edge* dari *graph*. Akibatnya, pada waktu-waktu tertentu, *graph* dapat berupa *directed graph* (*digraph*). DCSS dapat disimulasikan secara sinkron ataupun asinkron. Pada DCSS dengan mode sinkron, tiap *node* melakukan langkah-langkah SS secara bersamaan. Pada DCSS dengan mode asinkron, tiap *node* melakukan tahapan SS secara tidak bersamaan dan acak. Berdasarkan [15], mode asinkron dapat didekati dengan mode sinkron yang pada tiap iterasinya *graph* cenderung tidak sama dan bersifat acak. Model *graph* tersebut diadopsi sebagai *random graph*. Hal tersebut dapat diimplementasikan dengan memanfaatkan peubah acak. Dalam makalah ini, tiap *edge* pada model *random graph* memiliki peluang yang sama untuk mengalami galat (P_e). Peubah acak yang digunakan adalah peubah acak *Gaussian* standar. Pada Gambar 3, diperlihatkan contoh jaringan DCSS dengan *bidirectional link* dalam kondisi optimal atau tanpa galat pada *edge*. Bulatan merah adalah SU atau *node* dan garis hijau adalah *edge* yang berlaku dua arah antar *node*.

C. Consensus Method

Metode *consensus* menggunakan informasi pengukuran energi pada *band of interest* yang diperoleh secara

mandiri dan dari tetangga sebagai bahan CSS untuk *node* lokal. Tiap *node* saling mengoreksi pengukuran energi seiring berjalannya iterasi DCSS. Setelah iterasi DCSS dilakukan dalam jumlah yang banyak, didapatkan kesamaan pengukuran energi pada tiap *node*. Metode *consensus* dapat menghasilkan nilai pengukuran energi akhir yang berupa nilai rerata, maksimum, dan minimum dari pengukuran energi awal seluruh *node* [13]. Berikut adalah persamaan pengukuran energi *average-consensus* atau *mean-consensus* untuk SU- m dan iterasi ke- i

$$\Lambda_m^i = \Lambda_m^{i-1} + \epsilon \sum_{j \in \mathcal{N}_m} (\Lambda_j^{i-1} - \Lambda_m^{i-1}). \quad (26)$$

Pada (28), nilai ϵ dapat dipilih sebagai satu per *degree* tertinggi yang dimiliki oleh *node-node* dalam *graph* [13]

$$\epsilon \cong 1/\max_m(|\mathcal{N}_m|). \quad (27)$$

Secara berturut-turut, berikut ini adalah persamaan dari *max-consensus* dan *min-consensus* untuk SU- m dan iterasi ke- i

$$\Lambda_m^i = \max_{j \in \mathcal{N}_m} (\Lambda_j^{i-1}, \Lambda_m^{i-1}), \quad (28)$$

$$\Lambda_m^i = \min_{j \in \mathcal{N}_m} (\Lambda_j^{i-1}, \Lambda_m^{i-1}). \quad (29)$$

Metode *max-consensus* dan *min-consensus* mengasumsikan statistik derau yang sama pada tiap *node*. Uji hipotesis untuk *node-m* dan iterasi ke- z ditunjukkan sebagai berikut

$$D_m^z = \begin{cases} 1, & \Lambda_m^z > \lambda, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (30)$$

D. Distributed Decision Fusion

Seperti halnya pada CCSS, terdapat jenis informasi biner di samping informasi pengukuran energi pada *band of interest* yang dapat digunakan untuk CSS [16]. Informasi biner atau *decision* awal tiap SU didapatkan dari uji hipotesis secara mandiri yang dinotasikan dengan D_m^0 untuk *node-m* dan iterasi ke-0. Tiap SU menghitung jumlah tetangga yang mendeteksi PU dalam variabel *Vote* untuk SU- m dan iterasi ke- i sebagai berikut

$$\text{Vote}_m^i = D_m^i + \sum_{j \in \mathcal{N}_m} D_j^i. \quad (31)$$

$$D_m^{i,AND} = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{Vote}_m^{i-1} = (|\mathcal{N}_m| + 1) \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (32)$$

$$D_m^{i,Maj} = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{Vote}_m^{i-1} > (|\mathcal{N}_m|/2 + 1) \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$D_m^{i,OR} = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{Vote}_m^{i-1} \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Batas *voting* yang digunakan untuk *distributed decision fusion* adalah serupa dengan pada CCSS. Pada DCSS, digunakan *degree* dari *node* sebagai acuan.

E. Estimasi Performa DCSS

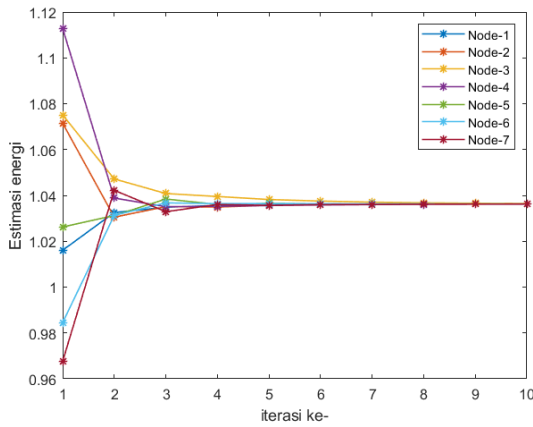
Tiap SU dalam DCSS mengolah informasi secara mandiri berdasarkan informasi yang diperoleh secara mandiri dan dari tetangga. Peninjauan performa DCSS secara optimal dilakukan ketika telah terjadi konvergensi informasi atau keputusan SS untuk *band of interest*. Konvergensi dapat dicek melalui visualisasi *test statistics* atau *decision* dari tiap *node* seperti dicontohkan pada

Gambar 4. Pada gambar tersebut, iterasi pertama adalah *step* ke-0 atau kondisi awal.

Dalam [13], informasi dalam DCSS telah konvergen saat perbedaan antar nilai pada tiap *node* di bawah 1 dB. Untuk mengakomodasi keadaan tidak tercapainya konvergensi, digunakan aturan mayoritas yang dianggap merepresentasikan keseluruhan anggota. Berikut adalah persamaan P_D dan P_{FA} untuk DCSS

$$\begin{aligned} P_{FA} &= \Pr\left(\left(\sum_{m=1}^M D_m^z\right) > M/2 \mid \mathcal{H}_0\right), \\ P_D &= \Pr\left(\left(\sum_{m=1}^M D_m^z\right) > M/2 \mid \mathcal{H}_1\right). \end{aligned} \quad (33)$$

Pada (35), nilai z merupakan suatu bilangan bulat positif dan *nonzero* sebagai penanda iterasi DCSS.



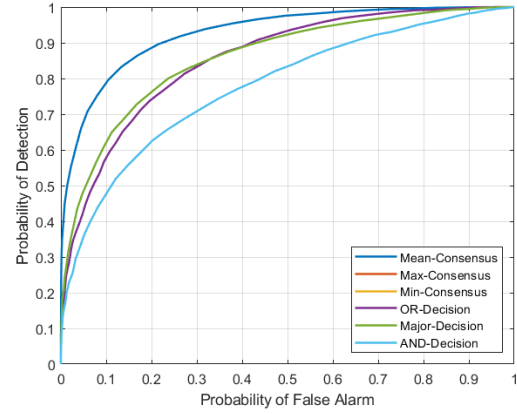
Gambar 4. Uji konvergensi DCSS dengan *average-consensus*.

F. Pengujian DCSS pada Fixed Graph

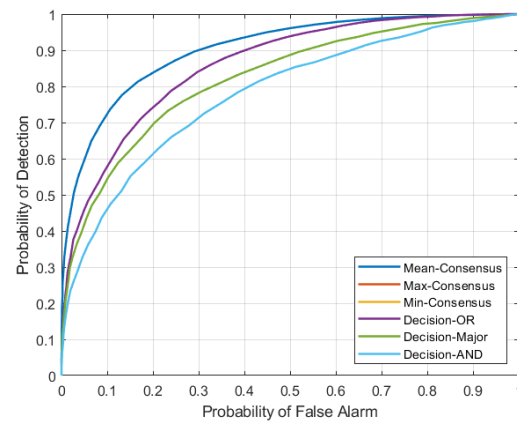
Pada pengujian DCSS dengan *fixed graph* atau skenario sinkron, didapatkan kurva ROC yang timpang tindih. Kurva tersebut adalah kurva ROC untuk metode *max-consensus* dengan *OR-decision* (*OR-rule*) dan *min-consensus* dengan *AND-decision* (*AND-rule*). Berdasarkan kurva ROC hasil pengujian pada Gambar 5, Metode *fusion* pada DCSS yang terbaik adalah *average-consensus* atau *mean-consensus*. Pengujian dilakukan pada kanal AWGN dengan rerata SNR -15 dB dan varians SNR 5 dB. Jumlah *node* yang terlibat adalah tujuh. Jumlah iterasi *distributed* yang digunakan adalah empat kali. Jumlah iterasi untuk pengujian DCSS didasari pada uji konvergensi pada Gambar 4. *Graph* yang diuji konvergensinya adalah *graph* yang sama dengan *graph* untuk pengujian DCSS sehingga dapat mencerminkan hasil simulasi.

G. Pengujian DCSS pada Random Graph

DCSS dengan *random graph* atau skenario *random link failure* memberikan efek penurunan performa karena proses pertukaran informasi tidak berjalan seperti seharusnya. Hal tersebut diperlihatkan pada Gambar 6 yang memiliki kurva ROC lebih buruk dibandingkan pada pengujian *fixed graph*. Semakin besar nilai P_e semakin besar pula penurunan performa yang terjadi.



Gambar 5. Kurva ROC DCSS dengan *fixed graph* untuk kanal AWGN.



Gambar 6. Kurva ROC dari DCSS dengan *random link failure* pada kanal AWGN dengan $P_e = 0.5$.

V. CSS DENGAN CCSS DAN DCSS TERHADAP IEEE 802.22

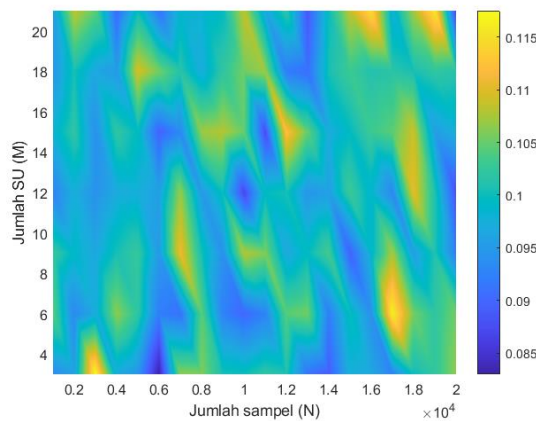
Kesuksesan perancangan ditunjukkan dengan lolos tidaknya hasil perancangan terhadap standar yang berlaku. Standar IEEE 802.22 mengatur bahwa nilai P_D minimal adalah 0.9 dan P_{FA} maksimal adalah 0.1 untuk kondisi SNR serendah -20 dB. Dalam konteks perancangan, nilai P_{FA} lebih menarik karena hanya terikat oleh derau di sisi SU dan tidak dipengaruhi oleh penerimaan isyarat PU yang juga mencakup faktor propagasi. Nilai P_{FA} dalam densitas *test statistics* merupakan area di bagian *upper tail* dari kurva distribusi $\Lambda_{\mathcal{H}_0}$. Dengan menggunakan metode *fusion* EGC, distribusi *test statistics* pada keadaan \mathcal{H}_0 adalah sebagai berikut

$$\Lambda_{\mathcal{H}_0} \sim \chi_{M \cdot N}^2 \cdot \sigma_w^2 / (M \cdot N). \quad (34)$$

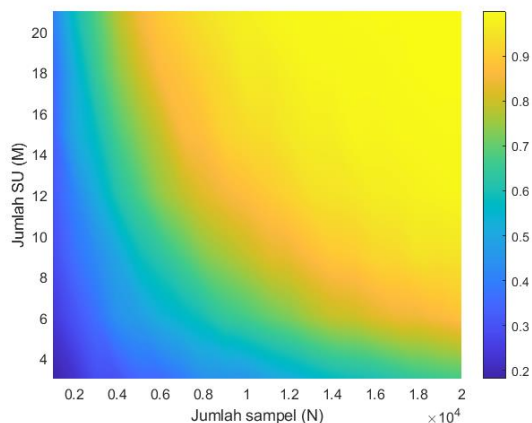
Berdasarkan (34), dapat dicari nilai threshold λ dengan menggunakan invers *central chi-square* CDF (*cumulative distribution function*) untuk mendapatkan performa P_{FA} tertentu. Metode penentuan *threshold* tersebut dinamakan sebagai *constant false alarm rate* (CFAR) [17]. Berikut ini adalah persamaan *threshold* untuk P_{FA} tertentu pada CCSS dengan EGC

$$\lambda = F_x^{-1}(1 - P_{FA}, M \cdot N) \cdot \sigma_w^2 / (M \cdot N). \quad (35)$$

Guna memastikan persamaan (34) dan (35), dilakukan simulasi dengan variasi jumlah SU dan sampel. Jumlah SU divariasikan dari 3 hingga 21 dengan *increment* sebanyak 3. Jumlah sampel divariasikan dari 1000 hingga 20000 dengan *increment* sebesar 1000. Hasil simulasi pada Gambar 7 menunjukkan bahwa nilai P_{FA} hasil simulasi telah mendekati nilai P_{FA} yang diinginkan yaitu 0.1. Estimasi P_D untuk tiap parameter yang bersesuaian dengan Gambar 7 ditunjukkan pada Gambar 8. Nilai SNR diatur sebesar -20 dB pada tiap variasi jumlah SU dan jumlah sampel. Batas nilai variasi parameter dipilih berdasarkan durasi simulasi yang dapat diterima yaitu selama kurang lebih 10 menit.



Gambar 7. Estimasi P_{FA} saat λ disesuaikan untuk P_{FA} bernilai 0.1.

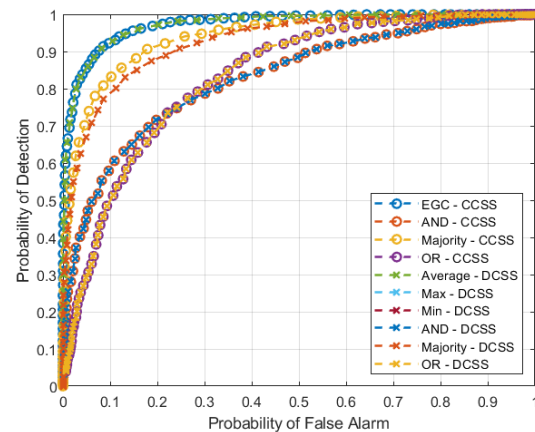


Gambar 8. Estimasi P_D dengan kanal AWGN dan SNR -20 dB saat *threshold* diatur agar mendapatkan $P_{FA} \cong 0.1$.

Sejauh ini, telah dimiliki data estimasi P_D pada $P_{FA} \cong 0.1$. Agar sistem CCSS dapat memenuhi standar, perlu dipilih jumlah SU dan sampel minimal yang memiliki P_D di atas 0.9. Pada Gambar 8, kombinasi jumlah SU dan sampel yang dapat memenuhi syarat adalah SU lebih dari 14 pada 10000 sampel. Pada dokumen ini, dipilih 15 SU dengan 10000 sampel yang berasosiasi dengan warna kuning cerah untuk CCSS.

Untuk skema DCSS, terlebih dahulu diinginkan untuk mengetahui persamaan performa metode *fusion* pada DCSS dengan CCSS. Tiap metode *fusion* pada DCSS dan CCSS dengan 15 SU dan 10000 sampel diuji pada kanal AWGN dengan rerata SNR -20 dB. Iterasi

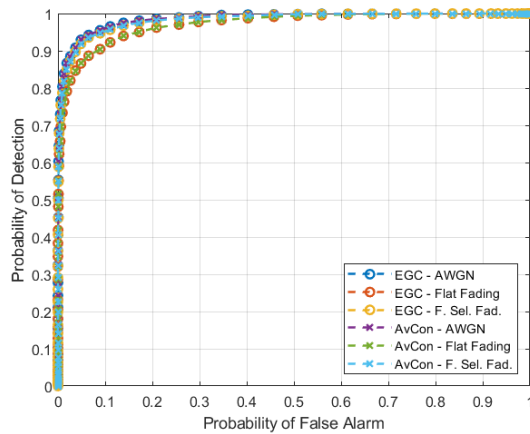
dalam DCSS dilakukan sebanyak 20 kali termasuk inisiasi DCSS. Pengujian CCSS dilakukan dengan mengasumsikan kondisi *perfect reporting channel* dan pengujian DCSS dilakukan dengan mengasumsikan kondisi *fixed graph*. Kurva ROC hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kurva ROC semua metode pada kanal AWGN dengan 15 SU dan 10000 sampel.

Pada Gambar 9, dapat dilihat bahwa metode *fusion* dari DCSS memiliki kemiripan performa dengan metode *fusion* pada CCSS. Yang dimaksud dengan kemiripan adalah bahwa nilai P_D yang diperoleh untuk nilai P_{FA} tertentu adalah tidak jauh berbeda. Hal tersebut dapat menjadi penanda keberhasilan DCSS dalam mengolah informasi SS. Metode *average-consensus* pada DCSS memiliki performa yang sama dengan EGC pada CCSS. Metode *OR-rule* pada CCSS memiliki performa yang mirip dengan *max-consensus* dan *OR-rule* pada DCSS. Metode *AND-rule* pada CCSS memiliki kemiripan performa dengan *min-consensus* dan *AND-rule* pada DCSS. Terakhir, metode *Majority-rule* pada CCSS memiliki kemiripan dengan *Majority-rule* pada DCSS. Dengan fakta ini, dapat diasumsikan bahwa jumlah SU dan sampel yang diperlukan untuk *average-consensus* adalah sama dengan EGC. Nilai P_D yang dapat dicapai oleh EGC pada CCSS dan *average-consensus* pada DCSS untuk P_{FA} sebesar 0.1 adalah sekitar 0.92 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9. Spesifikasi dari CSS untuk CCSS dan DCSS yang memenuhi standar IEEE 802.22 untuk kanal AWGN dapat disusun sebagaimana pada Tabel 1.

Pada persamaan (34), terdapat varians dari derau AWGN sebagai faktor *scaling* pada distribusi *central chi-square*. Oleh karena itu, nilai *threshold* perlu dikalikan dengan estimasi varians derau agar CSS dapat bekerja sesuai rancangan. Nilai 1.0047 pada CFAR didapatkan dengan menggunakan invers fungsi CDF dengan parameter probabilitas 0.9 dan DOF 15×10000 pada MATLAB. *Threshold* simulasi didapatkan melalui pengamatan pada statistik hasil simulasi untuk metode EGC saat $\hat{P}_{FA} = 0.1008$. Untuk kanal *Rayleigh frequency-selective fading* dan *Rayleigh flat fading*, dimungkinkan performa P_D tidak tercapai sebagaimana mestinya karena spesifikasi didapatkan dari pengujian untuk kanal AWGN.



Gambar 10. Pengujian variasi kanal *sensing* dengan rerata SNR -20 dB dan varians SNR 7 dB.

Tabel 1. Spesifikasi CSS untuk EGC dan *average-consensus*.

Parameter	Keterangan
Target SNR	-20 dB
Target P_{FA}	$\cong 0.1$
Target P_D	≥ 0.9
Jumlah SU (M)	15
Jumlah sampel (N)	10000
Threshold CFAR	$1.0047 \times \hat{\sigma}_w^2$
Threshold simulasi	$1.0048 \times \hat{\sigma}_w^2$

Hasil pengujian EGC dan *average-consensus* pada variasi kanal *sensing* dengan rerata SNR -20 dB dan varians SNR 7 dB ditunjukkan pada Gambar 10. Pada gambar tersebut, performa CSS dipengaruhi oleh jenis kanal *sensing*. Performa CSS pada kanal *frequency-selective* dengan enam *tap* berada sedikit di bawah kanal AWGN. Sebagai contoh, untuk nilai $P_{FA} \cong 0.1$, pendekatan EGC dengan kanal AWGN memberikan nilai P_D sebesar 0.965, sedangkan EGC dengan kanal *frequency-selective fading* memberikan nilai P_D sebesar 0.958. Hal yang sama juga berlaku untuk pendekatan *average-consensus*. Saat *tap* kanal *Rayleigh fading* berjumlah satu atau merupakan kanal *Rayleigh flat fading*, performa CSS lebih buruk dibandingkan dua pendekatan kanal sebelumnya. Pada Gambar 10, nilai P_D yang dapat dicapai pada $P_{FA} \cong 0.1$ adalah 0.933. Varians SNR turut memengaruhi performa CSS seperti ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10 pada kanal AWGN. Performa CSS relatif meningkat saat varians SNR meningkat.

VI. KESIMPULAN

Dalam dokumen ini, telah dipaparkan hasil simulasi sistem CSS berbasis ED dengan CCSS dan DCSS dalam skenario-skenario tertentu. CCSS memiliki keuntungan dalam kecepatan pemrosesan informasi SS dibanding DCSS yang memerlukan banyak iterasi untuk tingkat akurasi yang sama. Metode terbaik dalam CCSS adalah EGC dan metode terbaik pada DCSS adalah *average-consensus*. Kedua metode tersebut menggunakan mekanisme rerata pengukuran energi pada tiap SU.

Berdasarkan metode rerata tersebut, standar IEEE 802.22 dapat dipenuhi dengan menggunakan 15 SU dan 10000 sampel. Target P_{FA} adalah berkisar pada 0.1 dengan P_D bernilai di atas 0.9.

REFERENSI

- [1] E. Axell, G. Leus, E. G. Larsson, and H. V. Poor, "Spectrum sensing for cognitive radio: State-of-the-art and recent advances," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 29, no. 3, pp. 8–10, 2012, doi: 10.1109/MSP.2012.2183771.
- [2] Y. C. Liang, *Dynamic Spectrum Management From Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence*. Sichuan: Springer Open, 2020. doi: 10.1201/9781420013542-21.
- [3] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005, doi: 10.1109/JSAC.2004.839380.
- [4] S. Atapattu, C. Tellambura, and H. Jiang, *Energy Detection Technique for Spectrum Sensing in Cognitive Radio*, vol. 9, no. 1, 2010. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/10028>
- [5] I. F. Akyildiz, B. F. Lo, and R. Balakrishnan, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey," *Physical Communication*, vol. 4, no. 1, pp. 40–62, Mar. 2011. doi: 10.1016/j.phycom.2010.12.003.
- [6] M. C. Jeruchim, P. Balaban, and K. S. Shanmugan, *Simulation of Communication Systems Modeling, Methodology, and Techniques*. New York: Kluwers Academic, 2002.
- [7] B. C. Levy, *Principles of Signal Detection and Parameter Estimation*. 2008. doi: 10.1007/978-0-387-76544-0.
- [8] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables, and Stochastic Process*, 4th ed. McGraw-Hill, 2002.
- [9] A. Tkac, V. Wieser, and S. Pollak, "Calculation of impulse response in Rician and Rayleigh channel," in *Proceedings of 9th International Conference, ELEKTRO 2012*, 2012, pp. 99–102. doi: 10.1109/ELEKTRO.2012.6225580.
- [10] M. Ben Ghorbel, H. Nam, and M. S. Alouini, "Soft cooperative spectrum sensing performance under imperfect and non identical reporting channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 2, pp. 227–230, Feb. 2015, doi: 10.1109/LCOMM.2014.2377231.
- [11] C. Altay, H. B. Yilmaz, and T. Tugcu, "Cooperative sensing analysis under imperfect reporting channel," in *2012 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Jul. 2012, pp. 000770–000775. doi: 10.1109/ISCC.2012.6249392.
- [12] H. Guo, N. Reisi, W. Jiang, and W. Luo, "Soft combination for cooperative spectrum sensing in fading channels," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 975–986, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2628860.
- [13] Z. Li, F. R. Yu, and M. Huang, "A distributed consensus-based cooperative spectrum-sensing scheme in cognitive radios," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 1, pp. 383–393, 2010, doi: 10.1109/TVT.2009.2031181.
- [14] K. H. Rosen, *Discrete Mathematics and its Applications*, 7th ed. McGraw-Hill, 2011.
- [15] S. Giannini, A. Petitti, D. Di Paola, and A. Rizzo, "Asynchronous max-consensus protocol with time delays: Convergence results and applications," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 63, no. 2, pp. 256–264, 2016, doi: 10.1109/TCSI.2015.2512721.
- [16] N. Noorshams, M. Malboubi, and A. Bahai, "Centralized and decentralized cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A novel approach," in *2010 IEEE 11th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Jun. 2010, pp. 1–5. doi: 10.1109/SPAWC.2010.5670998.
- [17] R. Umar, A. U. H. Sheikh, and M. Deriche, "Unveiling the hidden assumptions of energy detector based spectrum sensing for cognitive radios," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 713–728, 2014, doi: 10.1109/SURV.2013.081313.00054.