

# Kinerja *Energy Detection Spectrum Sensing* untuk *Cognitive Radio* Menggunakan GNU Radio

Hudaya Muna Putra<sup>1</sup>, Sigit Basuki Wibowo<sup>2</sup>, Dyonisius Dony Ariananda<sup>3</sup>, Wahyu Dewanto<sup>4</sup>

**Intisari**—Peningkatan jumlah penerapan komunikasi nirkabel telah menyebabkan masalah kelangkaan spektrum. Di sisi lain, sistem yang ada saat ini tidak efisien dalam mengalokasikan spektrum frekuensi. Untuk mengatasi masalah ini, sebuah sistem diusulkan, yaitu radio kognitif (*cognitive radio*, CR). CR adalah radio cerdas yang mampu mengindra lingkungan, menemukan *spectrum hole*, dan menyesuaikan parameter transmisinya untuk memanfaatkan *spectrum hole* yang tersedia. Hal ini mempertegas pentingnya modul *spectrum sensing* untuk memungkinkan dioperasikannya sistem CR. Tujuan modul *spectrum sensing* adalah untuk mencapai penggunaan terbaik dari spektrum frekuensi yang tersedia. Sistem CR diimplementasikan pada pengguna sekunder (*secondary user*, SU) yang tidak berlisensi yang diizinkan untuk meminjam spektrum yang sedang tidak digunakan oleh pengguna utama (*primary user*, PU). Pada makalah ini, *spectrum sensing* berbasis deteksi energi (*energy detection*) diimplementasikan pada platform GNU Radio. Metode estimasi *power spectral density* (PSD) berdasarkan *periodogram* diimplementasikan dengan memanfaatkan fasilitas blok *Embedded Python* pada GNU Radio. Selanjutnya, modul *spectrum sensing decision* pada GNU Radio diimplementasikan. Modul ini membandingkan estimasi PSD isyarat PU yang terkena derau dengan sebuah *threshold*. Isyarat PU disimulasikan sebagai proses acak *bandpass* yang menempati pita frekuensi tertentu. Modul *spectrum sensing decision* dikembangkan untuk memungkinkan perhitungan *probability of detection* (PD) dan *probability of false alarm* (PFA) yang dilakukan dengan memanfaatkan blok *Embedded Python*. Salah satu indikator untuk mengevaluasi kinerja modul *spectrum sensing* adalah kurva *receiver operating characteristic* (ROC) berdasarkan hasil perhitungan PD dan PFA pada GNU Radio. Kemudian, kinerja *spectrum sensing* untuk SNR dan *threshold* yang berbeda-beda dihitung. Hasil menunjukkan bahwa *spectrum sensing* berbasis deteksi energi mampu menemukan keberadaan PU bila *signal-to-noise ratio* (SNR) cukup tinggi.

**Keywords**—*Cognitive Radio*, Deteksi Energi, GNU Radio, *Spectrum Sensing*.

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan pesat teknologi komunikasi nirkabel telah diikuti oleh munculnya penerapan-penerapan sistem nirkabel yang lebih baru. Dua dekade yang lalu, fasilitas komunikasi nirkabel hanya digunakan untuk mendukung komunikasi suara. Namun, saat ini komunikasi nirkabel telah dimanfaatkan pula untuk menyediakan komunikasi multimedia dalam berbagai

bentuk. Hal ini menyebabkan meningkatnya kebutuhan akan kecepatan transmisi yang lebih tinggi serta kualitas layanan yang lebih baik [1]. Karena dalam komunikasi nirkabel gelombang elektromagnetik ditransmisikan melalui media tak terpandu, spektrum frekuensi menjadi sumber daya yang sangat penting. Hal ini terjadi karena pita frekuensi yang sama tidak boleh dialokasikan untuk sumber isyarat yang berbeda tanpa regulasi yang jelas agar interferensi antarisyarat dapat dihindari. Telah diketahui bahwa semakin lebar pita frekuensi, semakin besar jumlah data yang dapat ditransmisikan melalui pita frekuensi tersebut dalam durasi waktu tertentu. Namun, secara alamiah ketersediaan spektrum frekuensi ini terbatas [1]. Kondisi ini, ditambah dengan munculnya banyak penerapan sistem nirkabel dalam satu dekade terakhir, telah menimbulkan masalah kelangkaan spektrum frekuensi. Masalah ini dapat diatasi dengan mengoptimalkan penggunaan spektrum frekuensi yang ada. Akan tetapi, jika optimisasi tidak dilakukan dengan baik, interferensi antara isyarat dari pengguna yang berbeda dapat terjadi, yang menyebabkan galat pada data yang ditransmisikan dan buruknya kualitas komunikasi.

Kebijakan dan strategi pengelolaan spektrum konvensional diatur oleh pemerintah [2]. Secara umum, pemerintah mengalokasikan spektrum frekuensi hanya untuk pengguna berlisensi. Namun, spektrum frekuensi berlisensi bisa jadi tidak selalu digunakan secara efisien. Federal Communication Commission (FCC) melaporkan bahwa penggunaan spektrum frekuensi berkisar antara 15% sampai 85% [3]. Hal ini menunjukkan bahwa alokasi spektrum frekuensi saat ini menyebabkan penggunaan spektrum frekuensi yang tidak efisien dan sporadis [1], [4]. Di sisi lain, sebagian besar spektrum frekuensi telah dialokasikan, sehingga menimbulkan kesulitan dalam menyediakan sumber daya spektrum bagi layanan nirkabel baru [5]. Untuk mengatasi masalah kelangkaan spektrum ini, perlu diciptakan teknik baru yang mampu mengelola pengalokasian sumber daya spektrum dengan efisien [1], [6]. Dengan kata lain, dibutuhkan pendekatan inovatif yang mampu menyelesaikan masalah kelangkaan spektrum frekuensi.

Dalam tahun-tahun terakhir ini, radio kognitif (*cognitive radio*, CR) telah diusulkan sebagai salah satu solusi bagi masalah kelangkaan spektrum. Referensi [7] menyatakan bahwa sistem CR adalah sebuah sistem komunikasi radio cerdas yang memiliki kemampuan untuk mengubah parameter transmisinya berdasarkan interaksinya dengan lingkungan sekitar. Penelitian yang luas tentang CR telah dilakukan. Penelitian-penelitian ini mencakup topik yang luas pula, seperti pengelolaan spektrum [8], *spectrum decision* [9], sistem *internet of things* (IoT) berbasis CR [10], dan *spectrum sensing*. Dalam jaringan CR, pengguna spektrum radio yang telah ada diklasifikasikan menjadi pengguna utama (*primary user*, PU)

<sup>1,2,3,4</sup> Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta 55281 INDONESIA (telp.: 0274-552305; email: <sup>1</sup>hudaya.muna.putra@mail.ugm.ac.id, <sup>2</sup>sigitbw@ugm.ac.id, <sup>3</sup>dyonisius.dony@ugm.ac.id, <sup>4</sup>wahyud@ugm.ac.id)

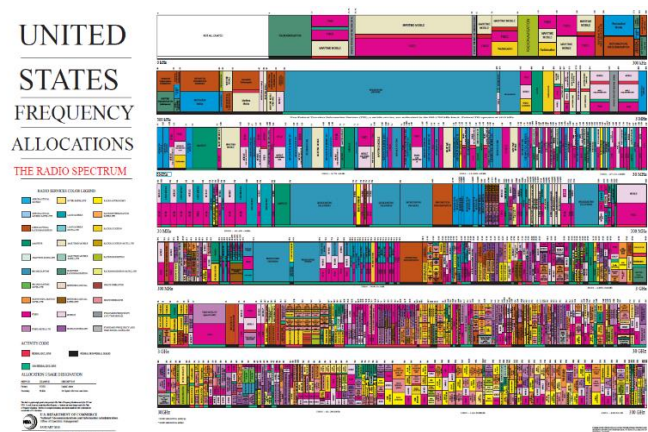
[Diterima: 4 Januari 2022, Revisi: 12 April 2022]

atau pengguna berlisensi (*licensed user*, LU) dan pengguna sekunder (*secondary user*, SU). PU adalah pengguna yang telah diberi lisensi oleh pemerintah untuk menggunakan pita frekuensi tertentu dan mentransmisikan isyaratnya pada pita tersebut. Sementara itu, SU adalah pengguna yang tidak memiliki lisensi pada pita frekuensi mana pun, tetapi diperbolehkan menggunakan spektrum frekuensi yang dimiliki PU ketika PU tidak aktif [11]. Dengan kata lain, interferensi antara isyarat-isyarat yang ditransmisikan oleh PU dan SU harus diminimalkan [2]. Untuk membantu SU dalam menentukan adanya PU pada pita frekuensi tertentu, diperlukan sebuah mekanisme *spectrum sensing* [12], [13].

Teknik *spectrum sensing* memungkinkan SU tanpa lisensi mengidentifikasi *spectrum hole*, yang dapat berupa spektrum tidak berlisensi maupun spektrum berlisensi yang saat itu sedang tidak digunakan oleh PU yang memiliki lisensi spektrum tersebut [9]. Adanya teknik *spectrum sensing* mencegah SU mentransmisikan isyarat pada pita frekuensi yang ditempati PU yang sedang aktif. Beberapa metode *spectrum sensing* yang populer termasuk *matched filter detection* [14], *cyclostationary feature detection* [15], dan deteksi energi (*energy detection*) [16]. Deteksi energi adalah pendekatan yang paling populer karena kompleksitasnya yang rendah [17]-[18]. Secara umum, pendekatan deteksi energi tidak memerlukan informasi apa pun mengenai parameter PU, meskipun masih memerlukan informasi tentang derau. Oleh karena itu, deteksi energi diklasifikasikan sebagai metode *semi-blind* [19], sehingga pendekatan deteksi energi memiliki kompleksitas yang rendah. Dalam pendekatan ini, keputusan mengenai adanya PU pada pita frekuensi tertentu diperoleh dengan membandingkan energi isyarat yang diterima pada pita tersebut dengan sebuah *threshold*.

Karena pengembangan sistem CR dapat sangat kompleks, adanya *platform* yang dapat menyimulasikan aspek-aspek penting sistem CR sebelum sistem tersebut didesain dan dikembangkan akan sangat membantu. Dalam makalah ini, pendekatan *spectrum sensing* berbasis deteksi energi untuk penerapan CR disimulasikan menggunakan GNU Radio. GNU Radio memungkinkan blok pengolahan isyarat disimulasikan pada *software-defined radio* [20]. GNU Radio dapat menyimulasikan sistem radio sebelum diimplementasikan pada perangkat keras. GNU Radio juga dapat digunakan bersama perangkat keras eksternal dengan harga terjangkau untuk mengimplementasikan sistem radio. GNU Radio memiliki banyak *library* blok pengolahan isyarat yang dapat digunakan untuk melakukan fungsi tertentu [4]. GNU Radio juga menyediakan fasilitas untuk mendesain blok dengan fungsi tertentu, dalam hal ini blok *spectrum sensing*, dengan memanfaatkan *library* blok pengolahan isyarat yang sudah ada.

Beberapa penelitian telah mengevaluasi pendekatan *spectrum sensing* berbasis deteksi energi dengan simulasi menggunakan GNU Radio [16], [18], [20], [21]. Dalam makalah ini, dibangun sebuah blok *spectrum sensing decision* yang membandingkan energi sebuah isyarat dengan *threshold*. Selain itu, dibangun juga blok-blok yang berfungsi untuk menghitung *probability of detection* (PD) dan *probability of false alarm* (PFA). Kurva *receiver operating characteristic*



Gbr. 1 Alokasi frekuensi di Amerika Serikat [22].

(ROC) yang dihasilkan dengan mengumpulkan PD dan PFA hasil perhitungan disajikan menggunakan MATLAB.

## II. COGNITIVE RADIO DAN SPECTRUM SENSING

Telah diketahui bahwa kecepatan transmisi data proporsional dengan lebar bidang yang digunakan. Namun, kebutuhan kecepatan transmisi yang lebih tinggi dalam sistem komunikasi nirkabel bertentangan dengan masalah kelangkaan spektrum, seperti telah dijelaskan sebelumnya, yang disebabkan oleh teknik alokasi spektrum yang masih kurang baik [12]. Pendekatan alokasi spektrum konvensional, yang memungkinkan LU dan PU menggunakan pita frekuensi tertentu, telah menyebabkan sumber daya spektrum menjadi terbatas, dengan pemanfaatan yang rendah [13]. Pendekatan alokasi spektrum model lama ini tidak mampu menangani permintaan penerapan komunikasi nirkabel kecepatan tinggi yang semakin meningkat.

Untuk menggarisbawahi masalah alokasi spektrum tersebut, laporan dari National Telecommunication and Information Administration (NTIA) tentang alokasi frekuensi disajikan pada Gbr. 1. Tampak bahwa sebagian besar frekuensi berlisensi telah dialokasikan untuk beberapa layanan [22], yang menimbulkan kesulitan dalam pengalokasian spektrum frekuensi untuk penerapan komunikasi nirkabel baru yang terus bermunculan akibat inovasi teknologi komunikasi nirkabel [12]. Di sisi lain, PU tidak selalu menggunakan frekuensi berlisensi yang dimiliki. Maka, pendekatan CR dapat berperan di sini, seiring makin diperlukannya pendekatan alokasi spektrum yang lebih inovatif untuk menyelesaikan masalah ketidakefisienan penggunaan spektrum. Pendekatan ini diharapkan akan dapat meningkatkan jumlah spektrum yang tersedia yang dapat dialokasikan untuk penerapan sistem nirkabel baru.

Konsep CR pertama kali diusulkan oleh Joseph Mitola III di akhir abad ke-20 [23]. Referensi [2] menyatakan bahwa CR merupakan sistem komunikasi nirkabel yang memiliki kecerdasan dan *awareness* tentang lingkungan sekelilingnya, membangun pengetahuan tentang lingkungannya, dan beradaptasi terhadap perubahan pada isyarat yang diterima dengan mengubah parameter komunikasinya untuk, di satu sisi, memastikan reliabilitas yang tinggi dalam proses komunikasi, dan di sisi lain meningkatkan efisiensi dalam penggunaan

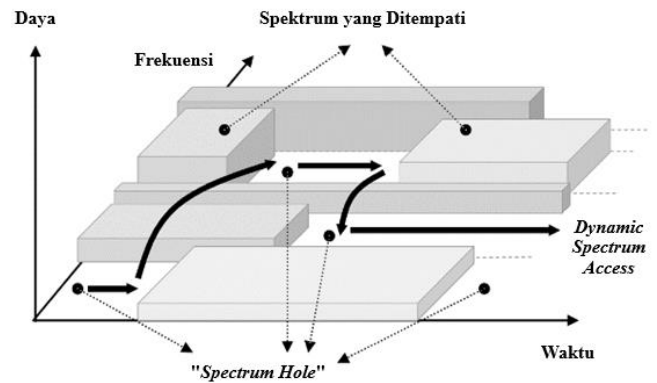
spektrumnya. Selain properti CR yang telah disebutkan, disebutkan juga bahwa CR harus dapat dikonfigurasi ulang [2].

Referensi [3] mendefinisikan CR sebagai sebuah sistem radio cerdas yang dapat berinteraksi dengan lingkungannya dan dapat mengubah parameter pemancarnya berdasarkan lingkungannya tersebut. Dari definisi tersebut, dapat disimpulkan dua karakteristik utama CR, yaitu kemampuan kognitif (*cognitive capability*) dan kemampuannya untuk dikonfigurasi ulang (*reconfigurability*) [3]. Kemampuan kognitif adalah kemampuan CR untuk mengumpulkan informasi dari lingkungannya untuk memperoleh pengetahuan yang lengkap mengenai keadaan penggunaan spektrum saat itu [3]. Kemampuan CR untuk dikonfigurasi ulang mengacu pada kemungkinan memprogram CR secara dinamis berdasarkan perubahan pada lingkungan sekitarnya. Hal ini juga berarti bahwa sistem CR mampu mentransmisikan dan menerima informasi pada frekuensi yang berbeda [3].

Pada jaringan CR, sebuah LU atau PU memiliki satu lisensi pada satu spektrum frekuensi tertentu, sehingga memiliki prioritas yang lebih tinggi untuk menggunakan pita frekuensi tersebut. Hanya ketika pita frekuensi ini tidak digunakan oleh PU (karena tidak aktif), sebuah SU dapat mentransmisikan isyaratnya pada pita tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa SU harus mampu memperkirakan aktif atau tidaknya sebuah PU pada suatu waktu tertentu. Dengan kata lain, SU harus memiliki kemampuan CR. Ada beberapa fungsi yang harus ada dalam sebuah jaringan CR, seperti *spectrum sensing*, *spectrum management*, *spectrum mobility*, dan *spectrum sharing* [3]. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa *spectrum sensing* merupakan hal yang sangat penting dalam jaringan CR [1] karena memberikan kemampuan kepada SU untuk menentukan keberadaan PU dalam sebuah frekuensi berlisensi.

Seperti telah disebutkan sebelumnya, tujuan utama *spectrum sensing* dalam jaringan CR adalah untuk menentukan adanya PU pada suatu pita frekuensi tertentu. Hal ini membantu SU dalam memutuskan dapat mentransmisikan isyaratnya pada pita tersebut atau tidak, tanpa menginterferensi isyarat PU [24]. Penerapan *spectrum sensing* pada sebuah sistem CR dipilih karena infrastruktur yang diperlukan lebih sederhana dan dapat dengan mudah diakomodasi pada penerapan yang luas [6]. Pada sistem CR, *spectrum sensing* bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik penggunaan spektrum, tidak hanya pada perspektif domain frekuensi, tetapi juga dalam perspektif domain spasial dan temporal [6]. Jika diperlukan, modul *spectrum sensing* juga dapat dikonfigurasi untuk menentukan tipe isyarat yang sedang menggunakan pita frekuensi tertentu beserta parameternya, seperti lebar pita, frekuensi pembawa, teknik modulasi, dan tipe gelombangnya [1].

Gbr. 2 mengilustrasikan sistem CR yang melakukan penginderaan spektrum frekuensi untuk menemukan *spectrum hole* di domain frekuensi. *Spectrum holes* berhubungan dengan pita frekuensi yang sedang tidak digunakan oleh PU atau yang tidak dialokasikan bagi PU mana pun. Adanya *spectrum hole* yang diidentifikasi dengan proses *spectrum sensing* identik dengan tidak adanya PU atau pengguna aktif lain pada pita frekuensi yang bersangkutan. Untuk memutuskan tidak adanya PU (atau adanya *spectrum hole*) pada suatu pita frekuensi



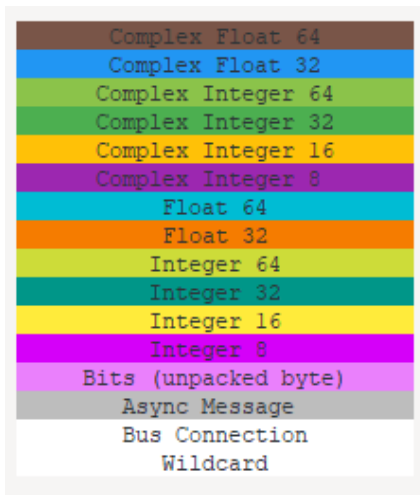
Gbr. 2 Spectrum hole [3].

tertentu, modul *spectrum sensing* perlu mengestimasi daya isyarat yang terukur pada pita tersebut, level derau terukur, dan level interferensi terukur. *Spectrum hole* dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori. Kategori pertama adalah *spatial hole*, yaitu pita frekuensi yang tidak dialokasikan bagi PU mana pun. Hal ini berarti bahwa sebuah SU langsung diizinkan menggunakan *spatial spectrum hole* selama tidak digunakan oleh SU yang lain. Tipe yang kedua adalah *temporal spectrum hole*, yaitu pita frekuensi yang dialokasikan pada sebuah PU, tetapi PU tersebut sedang tidak aktif pada pita tersebut. Ketika ada sebuah *temporal spectrum hole*, SU dapat menggunakannya [25]. Namun, SU perlu terus-menerus mengindra *temporal hole* selama proses transmisi isyaratnya dalam *spectrum hole* ini untuk mengidentifikasi jika PU yang memilikinya tiba-tiba aktif. Jika hal ini terjadi, SU harus melepaskan *spectrum hole* tersebut dan menghentikan transmisi isyaratnya. Berdasarkan jumlah SU dan adanya kerja sama dalam *spectrum sensing* di antara sejumlah SU tersebut, *spectrum sensing* juga dapat diklasifikasikan ke dalam *noncooperative sensing* dan *cooperative sensing*. Contoh *cooperative spectrum sensing* dijelaskan pada penelitian-penelitian sebelumnya [26]–[28].

### III. GNU RADIO

Perangkat lunak *open source* GNU Radio dapat digunakan untuk membuat sebuah *software-defined radio*. GNU Radio terdiri atas beberapa blok *library* pengolahan isyarat yang dapat dikombinasikan untuk melakukan fungsi tertentu dengan tujuan tertentu [16]. Selama eksperimen, implementasi dan desain sistem radio menggunakan GNU Radio dapat meminimalkan biaya, terutama karena kemampuannya beroperasi dengan perangkat keras frekuensi radio yang murah dengan menggunakan *software-defined radio*. Selain itu, GNU Radio juga dapat menyimulasikan sistem radio tanpa implementasi perangkat keras apa pun [29]. Terlebih lagi, blok pengolahan isyarat baru yang memiliki fungsi khusus dapat dibuat dengan mudah dalam GNU Radio. GNU Radio telah digunakan dalam banyak penelitian di bidang komunikasi nirkabel dan sistem radio oleh kalangan industri, pemerintah, dan akademisi.

Dalam penerapan GNU Radio, ada beberapa tipe data yang dapat digunakan, seperti ditunjukkan dalam Gbr. 3. Perbedaan warna dalam Gbr. 3 merepresentasikan tipe data yang berbeda.



Gbr. 3 Tipe data pada GNU Radio.

Perlu diingat bahwa beberapa blok hanya dapat mengolah masukan dengan tipe data tertentu. Akibatnya, dalam penelitian ini, blok tambahan untuk konversi tipe data digunakan untuk memastikan bahwa tipe masukan kompatibel dengan blok pengolahan isyarat tertentu. Contohnya adalah sebuah blok *Add* yang menghasilkan keluaran dengan tipe data *stream*. Ketika keluaran ini akan diproses sebagai masukan blok *fast Fourier transform* (FFT), keluaran ini perlu diubah ke dalam tipe data vektor, karena blok FFT hanya mengolah masukan dalam bentuk tersebut.

#### IV. MODEL SISTEM

Metode deteksi energi digunakan sebagai metode *spectrum sensing* untuk penerapan CR karena kompleksitasnya yang rendah. Kompleksitas yang rendah ini terjadi terutama karena metode ini tidak memerlukan informasi sebelumnya tentang PU. Walaupun secara umum deteksi energi dapat digunakan dalam kerangka kerja *cooperative* dan *noncooperative*, penelitian sebelumnya mengategorikan deteksi energi ke dalam deteksi *noncooperative* karena metode ini dapat digunakan oleh sistem CR tunggal untuk menetapkan adanya PU tanpa bekerja sama dengan sistem CR lain [3]. Deteksi energi dianggap sebagai pendeteksi yang optimal bila SU dapat mendeteksi PU tanpa informasi tentang PU [3]. Deteksi energi dapat dianggap sebagai *semi-blind sensing* karena *spectrum sensing* berbasis deteksi energi hanya memerlukan informasi daya dari derau acak.

*Spectrum sensing* berbasis deteksi energi memutuskan keberadaan PU dalam sebuah pita frekuensi dengan membandingkan energi isyarat yang diterima terhadap *threshold*. Secara umum, *spectrum sensing* berbasis deteksi energi memutuskan di antara dua hipotesis biner seperti pada (1).

$$y(t) = \begin{cases} w(t), & H_0 \\ s(t) + w(t), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

dengan  $y(t)$  adalah isyarat diterima terukur,  $w(t)$  adalah kontribusi dari *additive white Gaussian noise* (AWGN), dan  $s(t)$  adalah kontribusi dari isyarat yang dipancarkan oleh PU. Kedua hipotesis merepresentasikan keadaan biner isyarat yang

diterima pada pita frekuensi tertentu.  $H_0$  adalah hipotesis *null*, yang menandakan bahwa PU tidak ada pada pita frekuensi tertentu; sedangkan  $H_1$  adalah hipotesis alternatif, yang menandakan bahwa PU ada pada pita tersebut. Jika  $y(t)$  dicuplik, representasi digitalnya,  $y[n]$ , dapat ditulis sebagai berikut.

$$y[n] = \begin{cases} w[n], & H_0 \\ s[n] + w[n], & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

dengan  $n = 1, 2, 3, \dots, N$ . Notasi  $N$  adalah jumlah sampel (cuplikan) digital yang diperoleh selama periode observasi dan  $n$  menunjukkan indeks sampel. Pada metode deteksi energi, energi isyarat yang diterima selama suatu periode penginderaan dihitung untuk mendapatkan uji statistik energi. Keputusan adanya PU kemudian diperoleh dengan membandingkan uji statistik energi isyarat dengan *threshold*  $\tau$ . Uji statistik untuk deteksi energi dituliskan dalam (3).

$$A = \sum_{n=1}^N |y[n]|^2 \quad (3)$$

dengan  $A$  adalah uji statistik dari isyarat yang diterima dan  $|y[n]|^2$  adalah kuadrat dari magnitudo sampel  $y[n]$ . Karena proses *spectrum sensing* dilakukan menggunakan pengolah isyarat digital, dalam proses pencuplikan dilakukan kuantisasi, yang dapat menyebabkan galat kuantisasi. Dalam metode deteksi energi, energi isyarat yang diterima  $y[n]$  dinormalisasi untuk mengurangi varians derau dan meminimalkan galat kuantisasi. Uji statistik ternormalisasi  $A$  dinyatakan oleh (4).

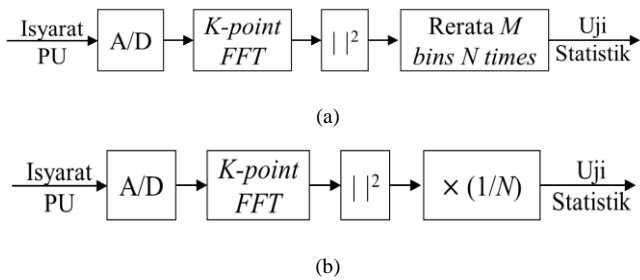
$$A = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y[n]|^2. \quad (4)$$

Alih-alih melakukan perhitungan menggunakan (4), dimungkinkan juga untuk menghitung *periodogram* sebagai estimasi *power spectral density* (PSD) dari isyarat yang diterima, yang dapat ditulis seperti pada (4a) [30].

$$P_y(j\omega) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N y[n] e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (4a)$$

dengan  $P_y(j\omega)$  merepresentasikan *periodogram*, yang dihitung dengan melibatkan penerapan *discrete-time Fourier transform* (DTFT) pada sampel digital yang diterima. Pada praktiknya, *periodogram* diimplementasikan dengan mengganti operasi DTFT pada (4a) dengan *discrete Fourier transform* (DFT) menggunakan algoritme FFT. Gbr. 4 memperlihatkan implementasi metode deteksi energi yang diterapkan pada *periodogram* yang diimplementasikan menggunakan FFT. Di sini, magnitudo kuadrat dari FFT pada  $M$  *frequency bins* yang berdekatan dirata-rata. Deteksi PU berdasarkan deteksi energi berbasis *periodogram* cukup populer karena kompleksitas dan biaya komputasinya yang rendah. Secara ringkas, dalam deteksi energi berbasis *periodogram*, energi diukur pada titik-titik frekuensi yang berbeda.

Dalam penelitian ini, deteksi energi juga diterapkan pada *periodogram* yang telah dihitung. Namun, metode *spectrum sensing* berbasis deteksi energi berbasis *periodogram* yang diimplementasikan dalam penelitian ini tidak mengikuti prosedur yang ditunjukkan pada Gbr. 4(a), tetapi mengikuti prosedur pada Gbr. 4(b). Ringkasnya, hasil magnitudo kuadrat dari FFT pada titik-titik frekuensi yang berdekatan tidak dirata-rata. Akan tetapi, magnitudo kuadrat pada sebuah titik



Gbr. 4 Deteksi energi berbasis *periodogram* yang diterapkan sebagai pendekatan *spectrum sensing*, (a) penelitian sebelumnya [12], (b) penelitian ini.

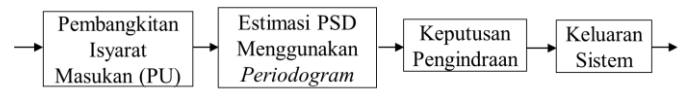
frekuensi individual langsung digunakan sebagai uji statistik untuk mengevaluasi adanya PU pada titik frekuensi tersebut. Anggap  $\Lambda_f$  sebagai uji statistik dalam Gbr. 4(b), yang berhubungan dengan magnitudo kuadrat ternormalisasi dari *periodogram* yang diukur pada frekuensi  $f$ . Sebuah *threshold* tertentu  $\tau$  kemudian diterapkan pada uji statistik  $\Lambda_f$ . Jika uji statistik  $\Lambda_f$  lebih tinggi daripada *threshold*  $\tau$ , disimpulkan bahwa sebuah PU ada pada titik frekuensi  $f$  (hipotesis alternatif  $H_1$  benar). Sebaliknya, jika uji statistik  $\Lambda_f$  lebih rendah daripada *threshold*  $\tau$ , diasumsikan bahwa tidak ada PU pada titik frekuensi  $f$  dan hipotesis *null*  $H_0$  benar. Kedua pernyataan di atas dapat dituliskan seperti pada (5).

$$\begin{aligned} \Lambda_f < \tau, & H_0 \\ \Lambda_f > \tau, & H_1 \end{aligned} \quad (5)$$

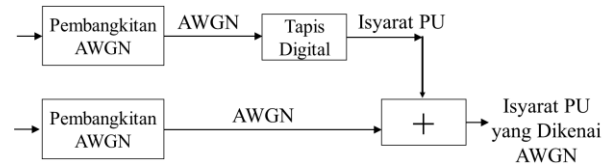
Kinerja metode *spectrum sensing* berbasis deteksi energi untuk CR disajikan dalam kurva ROC-nya, yang dihitung dengan mengubah-ubah *threshold*. Secara umum, penerapan pengujian hipotesis biner dalam (5) dapat menghasilkan salah satu dari keadaan-keadaan berikut.

- *True positive*, yang didefinisikan sebagai pernyataan bahwa PU ada ketika  $H_1$  benar. *True positive* menentukan nilai *probability of detection* (PD), yaitu  $P(H_1|H_1)$ .
- *True negative*, yang didefinisikan sebagai pernyataan bahwa PU tidak ada ketika  $H_0$  benar. *True negative* juga menentukan nilai PD, yaitu  $P(H_0|H_0)$ .
- *False positive*, yang didefinisikan sebagai pernyataan bahwa PU ada ketika  $H_0$  benar. *False positive* menentukan nilai *probability of false alarm* (PFA), yaitu  $P(H_1|H_0)$ .
- *False negative*, yang didefinisikan sebagai pernyataan bahwa PU tidak ada ketika  $H_1$  benar. *False negative* menentukan *probability of missed detection* (PM), yaitu  $P(H_0|H_1)$ .

Nilai PD yang tinggi merupakan indikasi dari proses penginderaan yang baik, yang menyatakan bahwa SU memiliki kemungkinan yang sangat baik untuk mendeteksi secara benar ada atau tidak adanya PU. Di sisi lain, nilai PFA dan PM yang tinggi mengindikasikan kualitas buruk proses *spectrum sensing*. *False alarm event* (yang secara salah memutuskan bahwa PU ada padahal sebenarnya tidak ada) mencegah SU menggunakan *spectrum hole* yang ada, yang menyebabkan penggunaan spektrum secara tidak efisien. *Miss detection event* (yang secara



Gbr. 5 Empat bagian utama dalam pendekatan *spectrum sensing* berbasis deteksi energi yang disimulasikan dalam GNU Radio.



Gbr. 6 Pembangkitan isyarat PU terganggu AWGN, yang menjadi masukan blok *spectrum sensing* berbasis deteksi energi yang disimulasikan.

salah memutuskan bahwa PU tidak ada tetapi sebenarnya ada) menyebabkan interferensi antara isyarat PU dan SU karena keputusannya menyesatkan SU sehingga SU tidak mengetahui keberadaan PU pada pita frekuensi yang dipertimbangkan dan mentransmisikan isyaratnya pada pita tersebut. Telah jelas bahwa proses *spectrum sensing* harus menghasilkan kinerja deteksi yang baik, yang ditandai dengan nilai PFA dan PM yang rendah serta nilai PD yang tinggi. Kinerja ini dapat diuji dengan mengevaluasi kurva ROC yang dihasilkan.

Dalam penelitian ini, GNU Radio digunakan untuk menyimulasikan pendekatan *spectrum sensing* berbasis deteksi energi yang ditunjukkan pada Gbr. 4(a). Isyarat PU dalam simulasi dihasilkan dengan menapis AWGN, dengan pita lewat tapis dikonfigurasi untuk menyimulasikan kasus PU menempati pita frekuensi yang sesuai dengan pita lewat tersebut. Cara ini memungkinkan disimulasikannya isyarat PU yang berbeda-beda yang menempati pita frekuensi mana pun dengan daya yang berbeda-beda. Untuk mengevaluasi kinerja pendekatan *spectrum sensing* yang disimulasikan, dua pita frekuensi yang berbeda diuji untuk menghitung PD dan PFA. Metode deteksi energi diterapkan pada pita frekuensi yang ditempati oleh PU untuk mengevaluasi PD. Di sisi lain, PFA dievaluasi dengan menerapkan deteksi energi pada pita frekuensi yang hanya berisi derau.

## V. SKENARIO EKSPERIMEN

Bagian ini mendiskusikan simulasi pendekatan *spectrum sensing* berbasis deteksi energi dalam Gbr. 4(a) menggunakan GNU Radio. Skenario yang digunakan dalam proses simulasi juga dibahas. Simulasi *spectrum sensing* berbasis deteksi energi dalam GNU Radio terdiri atas empat bagian utama, yang ditunjukkan pada diagram blok dalam Gbr. 5. Setiap blok atau bagian melakukan sebuah fungsi khusus dan dijelaskan dalam subbagian berikut ini.

### A. Pembangkitan Isyarat PU

Langkah pertama dalam simulasi *spectrum sensing* berbasis deteksi energi dalam GNU Radio adalah pembangkitan isyarat PU dalam bentuk sampel digital, yang ditunjukkan pada Gbr. 6. Isyarat PU berperan sebagai salah satu masukan bagi blok *spectrum sensing* berbasis deteksi energi yang disimulasikan dalam GNU Radio. Seperti diperlihatkan pada Gbr. 6, dua isyarat digital dibangkitkan untuk simulasi ini. Dua blok *Noise Source* yang sudah ada di *platform* GNU Radio digunakan

untuk membangkitkan isyarat-isyarat tersebut. Isyarat digital pertama adalah AWGN dan yang kedua adalah isyarat PU. AWGN dapat dibangkitkan dengan mengatur parameter distribusi derau pada blok *Noise Source* menjadi Gaussian. Isyarat PU diperoleh dengan membangkitkan terlebih dahulu AWGN lain yang kemudian dilewatkan pada sebuah tapis digital dengan pita lewat tapis diatur pada pita frekuensi tertentu. Pita frekuensi tertentu ini adalah pita yang ditempati oleh PU dalam skenario yang disimulasikan. Istilah “white” dalam AWGN mengandung arti bahwa AWGN memiliki distribusi daya yang seragam di semua frekuensi. AWGN yang ditapis akan memiliki daya hanya pada frekuensi sesuai pita lewat tapis tersebut. Setelah isyarat AWGN pertama dan isyarat PU dibangkitkan, isyarat AWGN pertama kemudian ditambahkan ke isyarat PU untuk menyimulasikan isyarat PU yang terganggu AWGN. Isyarat PU yang terganggu AWGN ini berperan sebagai masukan bagi blok *spectrum sensing* berbasis deteksi energi yang disimulasikan dalam GNU Radio.

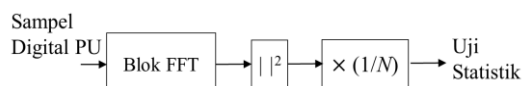
### B. Estimasi PSD

Variabel  $y[n]$  dalam (4a) diasumsikan merepresentasikan isyarat PU diterima yang terganggu AWGN, seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 6. Kemudian, estimasi PSD dari  $y[n]$  dilakukan dengan terlebih dahulu menerapkan FFT (menggunakan blok FFT pada GNU Radio) pada  $y[n]$ . Langkah berikutnya adalah menghitung magnitudo kuadrat dari hasil proses FFT, yang merepresentasikan magnitudo kuadrat dari spektrum  $y[n]$  pada frekuensi yang berbeda-beda. Kemudian, uji statistik pada titik-titik frekuensi yang berbeda diperoleh dengan menormalisasi magnitudo kuadrat dari spektrum dengan jumlah sampel digital  $N$ . Normalisasi ini dilakukan dengan menggunakan blok *Fast Multiply Constant* dalam GNU Radio. Perlu diingat bahwa estimasi PSD yang disimulasikan dalam GNU Radio merupakan metode *periodogram*. Gbr. 7 menyajikan proses estimasi PSD yang disimulasikan dalam GNU Radio.

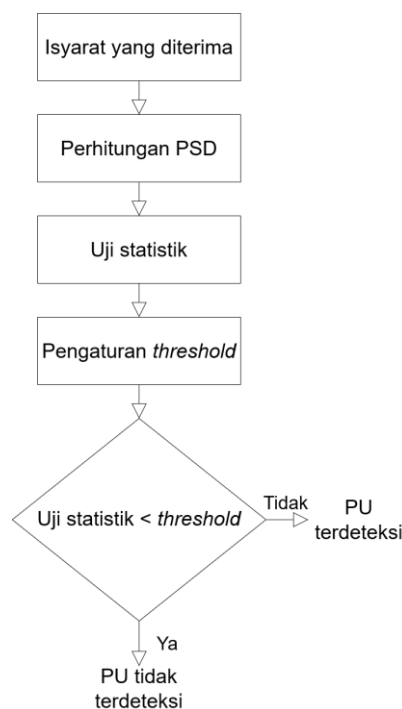
### C. Keputusan Pengindraan

Keputusan pengindraan adalah produk evaluasi dari uji statistik, yang diturunkan dari hasil estimasi PSD pada subbagian sebelumnya (subbagian B). Dengan menyelesaikan masalah hipotesis biner yang dirumuskan dalam (5), keputusan pengindraan dilakukan pada titik-titik frekuensi individual untuk menentukan sebuah PU ada pada titik frekuensi tertentu atau tidak. Diagram blok yang menunjukkan proses keputusan pengindraan diperlihatkan dalam Gbr. 8. Seperti tampak pada Gbr. 8, hipotesis *null*  $H_0$  dipilih jika uji statistik lebih rendah daripada *threshold*. Jika tidak,  $H_1$  yang dipilih. Proses ini diterapkan terhadap semua uji statistik pada titik-titik frekuensi yang berbeda seperti yang ditunjukkan dalam (5).

Keluaran keputusan pengindraan disajikan dalam *QT GUI Vector Sink* dalam bentuk *plot* indikasi metrik keberadaan pengguna (utama). Ketika nilai uji statistik lebih besar daripada *threshold* untuk suatu titik frekuensi tertentu, nilai indikasi metrik keberadaan pengguna diatur menjadi 1. Pada keadaan selain itu, nilai indikasi diatur 0. Evaluasi uji statistik untuk titik-titik frekuensi yang berbeda dilakukan beberapa kali untuk realisasi yang berbeda dari isyarat PU dan derau. Dengan



Gbr. 7 Ilustrasi estimasi PSD yang disimulasikan dalam GNU Radio.



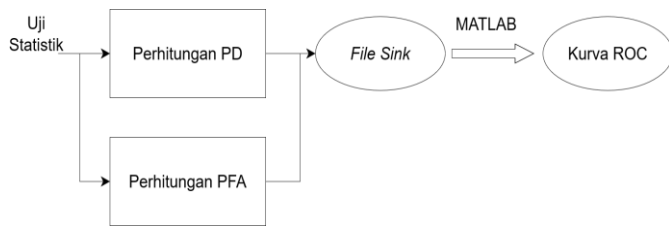
Gbr. 8 Diagram blok yang mengilustrasikan proses keputusan pengindraan.

memvariasikan *threshold*, PD dan PFA dapat dihitung untuk tiap *threshold* dan kurva ROC dapat diperoleh.

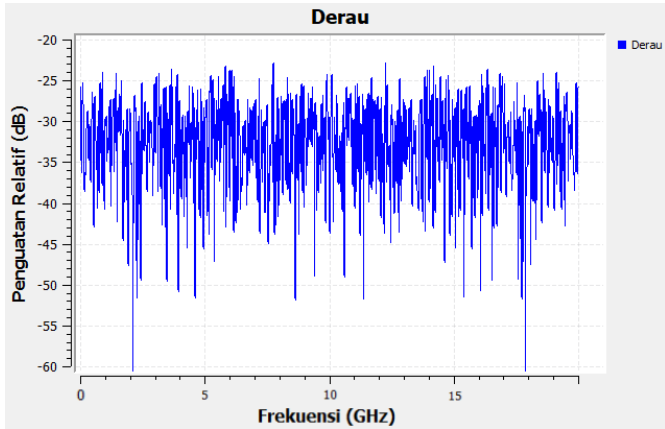
### D. Hasil Spectrum Sensing

Perhitungan PD dan PFA didasarkan pada kejadian ketika *threshold* kurang dari nilai uji statistik. Kejadian-kejadian deteksi (*detection events*) yang berkontribusi pada perhitungan PD dievaluasi pada pita frekuensi yang ditetapkan pada PU (yaitu pita lewat tapis digital yang diterapkan pada derau AWGN untuk membangkitkan isyarat PU). Di sisi lain, kejadian *false alarm* yang berkontribusi pada perhitungan PFA dievaluasi pada pita frekuensi selain pita yang ditetapkan untuk PU. Jumlah total kejadian deteksi dan kejadian *false alarm* pada titik-titik frekuensi yang berbeda kemudian dibagi dengan jumlah percobaan dan jumlah *points of interest* frekuensi, menghasilkan, berturut-turut, PD dan PFA.

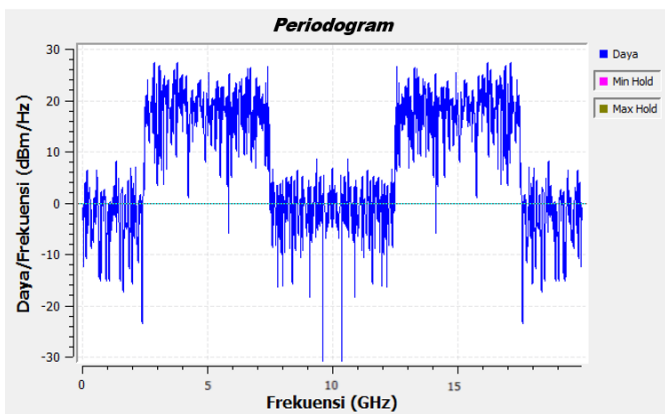
Hasil keputusan pengindraan dan perhitungan PD dan PFA ditampilkan dengan blok *Sink* dalam GNU Radio. Gbr. 9 menunjukkan prosedur untuk menghasilkan *plot* ROC berdasarkan hasil perhitungan PD dan PFA. Hasil keputusan pengindraan dapat diamati dengan *QT GUI Vector Sink*. Hasil perhitungan PD dan PFA kemudian disimpan menggunakan blok *File Sink* dalam bentuk *file* biner. Untuk membaca *file* biner dan menghasilkan kurva ROC, digunakan MATLAB dengan memanfaatkan perintah *fopen()*. Kurva ROC (yang merupakan *plot* PD terhadap PFA untuk *threshold* yang berbeda-beda) kemudian ditampilkan menggunakan *platform* MATLAB. Prosedur ini diperlihatkan pada Gbr. 9.



Gbr. 9 Perhitungan PD dan PFA diikuti penyajian ROC.



Gbr. 10 Derau ditampilkan dengan QT GUI Frequency Sink.

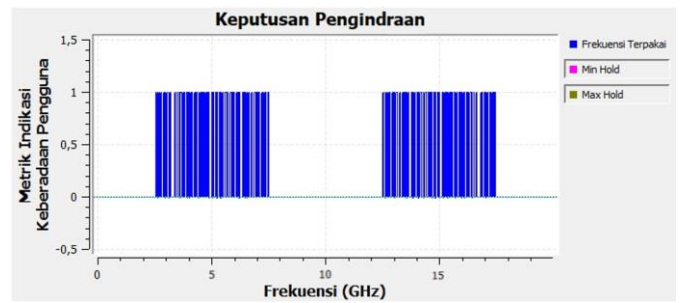


Gbr. 11 Keluaran estimasi PSD isyarat PU terganggu yang ditampilkan menggunakan QT GUI Vector Sink.

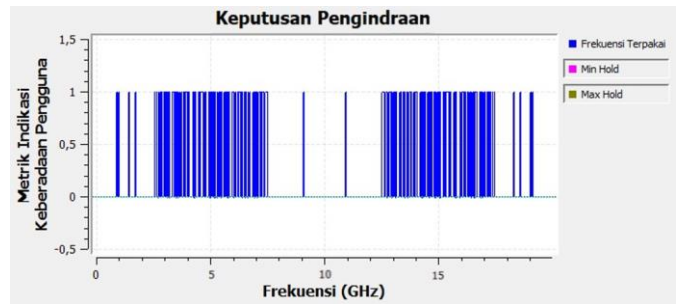
VI. HASIL

Bagian ini mengevaluasi simulasi *spectrum sensing* berbasis deteksi energi dalam *platform* GNU Radio dan membahas kinerja deteksinya untuk skenario tertentu. Analisis kinerja deteksi untuk skenario tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan *plot* ROC yang dihasilkan.

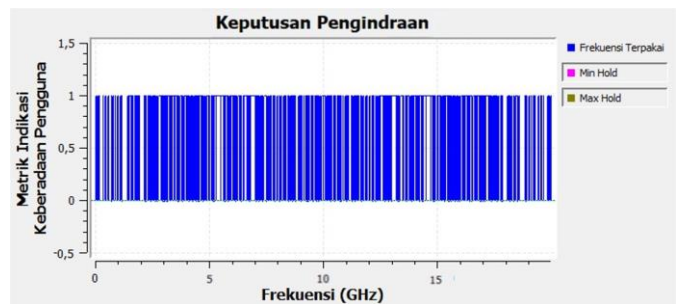
Seperti telah disebutkan pada bagian V, dua realisasi AWGN menggunakan blok *Noise Source* dalam *platform* GNU Radio dibangkitkan terlebih dahulu. Realisasi pertama digunakan untuk menyimulasikan adanya derau aditif pada penerima CR. Gbr. 10 memperlihatkan representasi AWGN pada domain frekuensi yang ditampilkan pada GNU Radio menggunakan *QT GUI Frequency Sink*. AWGN dibangkitkan dengan varians derau 1 mW mengikuti distribusi AWGN. Seperti dijelaskan sebelumnya, AWGN mengontaminasi isyarat PU, yang dihasilkan dengan menapis AWGN lain yang memiliki varians



(a)



(b)



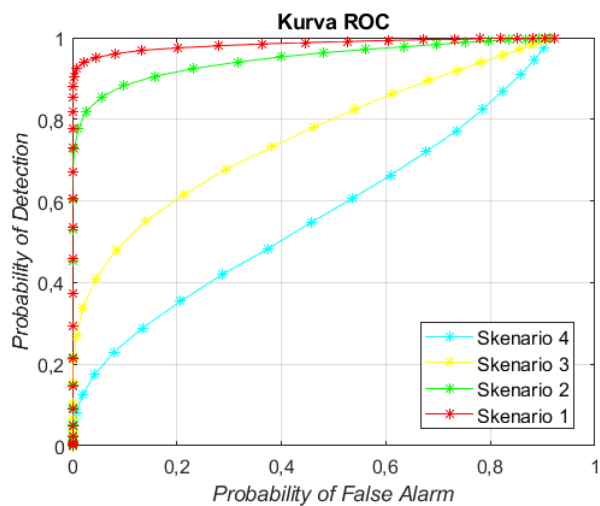
(c)

Gbr. 12 Daya PU pada pita frekuensinya diatur 100 mW, sedangkan varians derau diatur pada (a) 1 mW, (b) 25 mW, (c) 100 mW.

100 mW pada frekuensi 2,5 GHz sampai 7,5 GHz. Penjumlahan isyarat PU dan AWGN dilakukan menggunakan blok *Add*.

Ketika pembangkitan isyarat telah selesai, PSD isyarat PU yang terkena derau diestimasi menggunakan pendekatan *periodogram* dan hasilnya ditampilkan menggunakan *QT GUI Vector Sink*, seperti ditunjukkan pada Gbr. 11. Estimasi PSD memberikan gambaran mengenai tersebarnya energi isyarat PU yang terkena derau sepanjang titik-titik frekuensi yang berbeda. Tampak pada Gbr. 11 bahwa estimasi PSD dapat mengidentifikasi keberadaan PU pada frekuensi antara 2,5 hingga 7,5 GHz (yang merupakan pita frekuensi isyarat PU yang disimulasikan). Perlu dicatat bahwa frekuensi cuplik yang digunakan adalah 20 GHz, sehingga nilai estimasi PSD pada frekuensi 10 GHz hingga 20 GHz merupakan cerminan dari estimasi PSD antara frekuensi 0 GHz sampai 10 GHz.

Gbr. 12 memperlihatkan keputusan penginderaan yang menyatakan keberadaan pengguna pada titik-titik frekuensi yang berbeda. Proses keputusan penginderaan menyatakan adanya pengguna pada suatu titik frekuensi tertentu jika energi yang diindra pada titik frekuensi tersebut lebih tinggi daripada *threshold*. Pada kasus ini, indikasi metrik keberadaan pengguna



Gbr. 13 Kurva ROC proses deteksi energi.

TABEL I  
SKENARIO KINERJA DETEKSI

Skenario	Daya Relatif PU terhadap Daya Derau pada Pita Frekuensi yang Ditempati Sebuah PU
1	10
2	5
3	2
4	1

(lihat Gbr. 12) diatur pada 1. *Threshold* yang digunakan untuk memperoleh hasil pada Gbr. 12 adalah 10 dBm. Keluaran proses keputusan penginderaan ditandai dengan metrik keberadaan pengguna, yang diatur pada nilai 1 jika proses penginderaan menyatakan adanya PU pada suatu titik frekuensi tertentu dan nilai 0 jika terjadi sebaliknya. Gbr. 12 menunjukkan bahwa keputusan penginderaan yang lebih baik terjadi ketika nilai SNR lebih besar. Sebagai contoh, ketika daya PU pada pita aktifnya adalah 100 mW dan varians derau adalah 1 mW, ditunjukkan pada Gbr. 12(a) bahwa proses *spectrum sensing* hanya menyatakan keberadaan isyarat PU pada pita frekuensi aktual PU. Jika varians derau dinaikkan menjadi 25 mW (simpangan baku diatur  $5 \text{ mW}^{0.5}$ ), tampak pada Gbr. 12(b) bahwa *spectrum sensing* dalam SU mulai menghasilkan keputusan yang salah dengan menyatakan keberadaan pengguna pada beberapa titik frekuensi yang sebenarnya hanya mengandung derau. Ini menunjukkan bahwa kejadian *false alarm* telah terjadi. Proses keputusan penginderaan memberikan hasil yang buruk jika varians derau dinaikkan menjadi 100 mW (simpangan baku diatur  $10 \text{ mW}^{0.5}$ ). Di sini, daya PU pada pita frekuensinya sama dengan varians derau. Situasi ini diperlihatkan pada Gbr. 12(c). Tampak bahwa proses keputusan penginderaan menyatakan keberadaan PU pada hampir semua titik frekuensi, yang mengakibatkan tingkat *false alarm* yang sangat tinggi.

Perhitungan PD dan PFA dilakukan oleh blok perhitungan PD dan PFA dalam GNU Radio, yang dibangun dari blok *Embedded Python*. Ukuran FFT dalam percobaan diatur sebesar 1.024. Hasil perhitungan disimpan menggunakan blok *File Sink* dan kemudian diproses lebih lanjut untuk memperoleh

kurva ROC. Kurva ROC berdasarkan perhitungan PD dan PFA di-plot dalam MATLAB. Gbr. 13 memperlihatkan kurva ROC untuk proses deteksi energi yang disimulasikan dalam GNU Radio. Kurva ROC ini menyajikan nilai PD pada nilai PFA yang berbeda-beda, yang dihasilkan dengan mengubah-ubah *threshold*. Kemudian, empat skenario percobaan seperti yang tersaji di Tabel I dilakukan. Dapat dilihat bahwa secara umum *spectrum sensing* berbasis deteksi energi memiliki kinerja yang lebih baik pada SNR yang lebih tinggi. Seperti yang telah disebutkan di bagian IV, PD yang lebih tinggi dan PFA yang lebih rendah menunjukkan keputusan penginderaan yang lebih baik. Sebagai contoh, dalam Skenario 1 dengan varians derau 1 mW dan daya PU pada pita frekuensinya sebesar 100 mW, kinerja deteksi energi sangatlah baik. Dalam skenario ini, nilai PD lebih tinggi dan nilai PFA lebih rendah daripada kedua nilai tersebut pada skenario lain. Sebaliknya, kinerja deteksi energi yang dibangun dalam Skenario 4 lebih buruk daripada kinerja pada skenario lainnya karena SNR yang sangat rendah. Dari hasil yang telah disebutkan, dapat disimpulkan bahwa *spectrum sensing decision* berbasis deteksi energi memiliki sensitivitas tinggi terhadap derau karena *spectrum sensing* berbasis deteksi energi hanya membandingkan energi yang diterima pada titik frekuensi tertentu terhadap *threshold*, terlepas dari karakteristik lain yang dapat membedakan isyarat yang dikirimkan dari derau. Terlebih lagi, dibutuhkan pengetahuan tentang varians derau untuk menentukan *threshold* yang layak.

## VII. KESIMPULAN

Dalam makalah ini, simulasi *spectrum sensing* berbasis deteksi energi pada platform GNU Radio dilakukan. PSD dari isyarat PU yang terganggu derau dihitung menggunakan *periodogram*, yang merupakan salah satu teknik estimasi PSD. Blok *periodogram* diimplementasikan dalam GNU Radio dengan memanfaatkan blok *Embedded Python* yang tersedia dalam platform GNU Radio. Berdasarkan hasil perhitungan *periodogram*, proses *spectrum sensing* menyatakan keberadaan PU dengan membandingkan uji statistik energi dengan *threshold*. PD dan PFA pada GNU Radio dihitung dengan memanfaatkan blok *Embedded Python* untuk mengevaluasi kualitas proses keputusan penginderaan. Kinerja metode deteksi energi diuji dengan mengevaluasi kurva ROC PD dan PFA yang dihasilkan, yang di-plot berdasarkan *threshold* yang berbeda. Simulasi dilakukan untuk nilai SNR yang berbeda-beda. Hasilnya menunjukkan bahwa deteksi energi memiliki kinerja yang lebih baik untuk SNR yang lebih tinggi, yang menandakan bahwa metode ini memiliki sensitivitas tinggi terhadap derau. Namun, perlu diingat bahwa deteksi energi memerlukan informasi hanya tentang varians derau dan tidak memerlukan informasi sebelumnya mengenai isyarat PU. Oleh karena itu, kompleksitas metode deteksi energi ini rendah.

## KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa makalah dengan judul "Kinerja *Energy Detection Spectrum Sensing* untuk *Cognitive Radio* Menggunakan GNU Radio" ini terbebas dari konflik kepentingan.



## KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, metodologi, perangkat lunak, validasi, analisis formal, dan sumber daya, Hudaya Muna Putra, Sigit Basuki Wibowo, dan Dyonisius Dony Ariananda; penulisan—penyusunan draf asli, Hudaya Muna Putra; peninjauan, penyuntingan, dan pengawasan, Sigit Basuki Wibowo, Dyonisius Dony Ariananda, dan Wahyu Dewanto.

## REFERENSI

- [1] T. Yücek dan H. Arslan, "A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, Vol. 11, No. 1, hal. 116–130, 2009.
- [2] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 23, No. 2, hal. 201–220, Feb. 2005.
- [3] I.F. Akyildiz, W.Y. Lee, M.C. Vuran, dan S. Mohanty, "NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey," *Comput. Netw.*, Vol. 50, No. 13, hal. 2127–2159, Sep. 2006.
- [4] R.A. Rashid, dkk., "Enabling Dynamic Spectrum Access for Cognitive Radio Using Software Defined Radio Platform," *2011 IEEE Symp. Wirel. Technol., Appl. (ISWTA)*, 2011, hal. 180–185.
- [5] A. Ghasemi dan E.S. Sousa, "Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Requirements, Challenges and Design Trade-Offs," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 46, No. 4, hal. 32–39, Apr. 2008.
- [6] M. Nayak, dkk., "A Real Time Implementation of Spectrum Sensing System Using Software Defined Radio," *2017 Int. Conf. Intell. Comput. Instrum. Control Technol. (ICICT)*, 2018, hal. 603–607.
- [7] *Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies*, FCC-03-322, Federal Communications Commission, Washington, D.C., AS, Des. 2003.
- [8] I.F. Akyildiz, W.Y. Lee, M.C. Vuran, dan S. Mohanty, "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 46, No. 4, hal. 40–48, Apr. 2008.
- [9] M.T. Masonta, M. Mzyece, dan N. Ntlatlapa, "Spectrum Decision in Cognitive Radio Networks: A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, Vol. 15, No. 3, hal. 1088–1107, 2013.
- [10] F.A. Awin, Y.M. Alginahi, E.A. Raheem, dan K. Tepe, "Technical Issues on Cognitive Radio-Based Internet of Things Systems: A Survey," *IEEE Access*, Vol. 7, hal. 97887–97908, 2019.
- [11] D.D. Ariananda, "On Wavelet Based Spectrum Estimation for Dynamic Spectrum Access", Tesis, Delft University of Technology, Delft, Belanda, 2009.
- [12] I. Budiarjo, M.K. Lakshmanan, dan H. Nikookar, "Cognitive Radio Dynamic Access Techniques," *Wirel. Pers. Commun.*, Vol. 45, No. 3, hal. 293–324, Mei 2008.
- [13] E. Axell, G. Leus, E.G. Larsson, dan H.V. Poor, "Spectrum Sensing for Cognitive Radio: State-of-the-Art and Recent Advances," *IEEE Signal Process. Mag.*, Vol. 29, No. 3, hal. 101–116, Mei 2012.
- [14] F. Salahdine, H.E. Ghazi, N. Kaabouch, dan W.F. Fihri, "Matched Filter Detection with Dynamic Threshold for Cognitive Radio Networks," *2015 Int. Conf. Wirel. Netw., Mobile Commun. (WINCOM)*, 2015, hal. 1–6.
- [15] J. Chen, A. Gibson, dan J. Zafar, "Cyclostationary Spectrum Detection in Cognitive Radios," *IET Semin. Cogn. Radio, Softw. Defined Radios: Technol., Techn.*, 2008, hal. 1–5.
- [16] M.A. Sarijari, dkk., "Energy Detection Sensing Based on GNU Radio and USRP: An Analysis Study," *2009 IEEE 9th Malaysia Int. Conf. Commun. (MICC)*, 2009, hal. 338–342.
- [17] M.R. Manesh, M.S. Apu, N. Kaabouch, dan W.-C. Hu, "Performance Evaluation of Spectrum Sensing Techniques for Cognitive Radio Systems," *2016 IEEE 7th Annu. Ubiquitous Comput. Electron., Mobile Commun. Conf. (UEMCON)*, 2016, hal. 1–7.
- [18] J. Talukdar, B. Mehta, K. Aggrawal, dan M. Kamani, "Implementation of SNR Estimation Based Energy Detection on USRP and GNU Radio for Cognitive Radio Networks," *2017 Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process., Netw. (WiSPNET)*, 2017, hal. 304–308.
- [19] M.A. Fouda, A.S.T. Eldien, dan H.A.K. Mansour, "FPGA Based Energy Detection Spectrum Sensing for Cognitive Radios under Noise Uncertainty," *2017 12th Int. Conf. Comput. Eng., Syst. (ICCES)*, 2017, hal. 584–591.
- [20] G. Swetha dan B.N. Bhandari, "Energy Detection Spectrum Sensing on DPSK Modulation Transceiver Using GNU Radio," *2017 2nd Int. Conf. Conver. Technol. (I2CT)*, 2017, hal. 974–978.
- [21] K.S. Gill dan A.M. Wyglinski, "Heterogeneous Cooperative Spectrum Sensing Test-Bed Using Software-Defined Radios," *2017 IEEE 86th Veh. Technol. Conf. (VTC-Fall)*, 2017, hal. 1–5.
- [22] United States Department of Commerce, "United States Frequency Allocations Chart," 2016.
- [23] J. Mitola dan G.Q. Maguire, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal," *IEEE Pers. Commun.*, Vol. 6, No. 4, hal. 13–18, Agu. 1999.
- [24] D. Cabric, A. Tkachenko, dan R.W. Brodersen, "Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy, and Collaborative Detection," *MILCOM 2006 - 2006 IEEE Mil. Commun. Conf.*, 2006, hal. 1–7.
- [25] A. Bujunuru dan T. Srinivasulu, "A Survey on Spectrum Sensing Techniques and Energy Harvesting," *2018 Int. Conf. Recent Innov. Elect. Electron., Commun. Eng. (ICRIEECE)*, 2018, hal. 751–755.
- [26] F. Zeng, C. Li, dan Z. Tian, "Distributed Compressive Spectrum Sensing in Cooperative Multihop Cognitive Networks," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, Vol. 5, No. 1, hal. 37–48, Feb. 2011.
- [27] S. Maleki, A. Pandharipande, dan G. Leus, "Energy-Efficient Distributed Spectrum Sensing for Cognitive Sensor Networks," *IEEE Sensors J.*, Vol. 11, No. 3, hal. 565–573, Mar. 2011.
- [28] D.D. Ariananda, D. Romero, dan G. Leus, "Cooperative Compressive Power Spectrum Estimation in Wireless Fading Channels," *2017 Int. Conf. Elect. Eng., Inform. (ICELTICs)*, 2017, hal. 18–23.
- [29] B.B. Harianto, A.P. Prabowo, dan N. Prabudiyatno, *Komunikasi Analog dan Digital dengan Software Defined Radio dan GNU Radio*. Surabaya, Indonesia: Deepublish, 2020.
- [30] P. Stoica dan R. Moses, *Spectral Analysis of Signals*. Upper Saddle River, AS: Prentice Hall, 2005.