



## Pendekatan Dan Metode *Spectrum Sensing* Dalam Tinjauan Literatur

Rahardian Luthfi Prasetyo<sup>1</sup>, Ahmad Nugroho Jati<sup>2</sup>, I Made Adhi Wiryawan<sup>3</sup>,  
Muhammad Ibkar Azki Himmawan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ITS PKU Muhammadiyah Surakarta

Alamat: Jl. Tulang Bawang Sel. No.26, Kadipiro, Kec. Banjarsari, Kota Surakarta, Jawa Tengah 57136

<sup>2,3,4</sup>Universitas Gadjah Mada

Alamat: Komplek Fakultas Teknik UGM, Jl. Grafika No.2, Yogyakarta, Sendowo, Sinduadi, Kec. Mlati, Kota Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

Korespondensi penulis: [rahardianlp@itspku.ac.id](mailto:rahardianlp@itspku.ac.id)

**Abstract.** *The utilization of radio wave spectrum has seen a rapid increase in the past few decades, yet it doesn't align with the availability of frequencies accessible to users. This phenomenon is exacerbated by the abundance of frequency bands left unused by their owners, thereby creating spectrum holes or white spaces. In this context, Cognitive radio (CR) technology becomes crucial as it enables secondary users to access and utilize spectrum holes without interfering with primary users. CR facilitates adaptability of radio devices by employing the cognitive cycle, with the primary stage being Spectrum sensing, where CR devices search for spectrum holes within the available radio spectrum. The subsequent stages, Spectrum analysis and Spectrum Decision, enable CR to optimize spectrum usage according to encountered conditions. This paper aims to provide a brief overview of CR implementation, particularly focusing on spectrum sensing aspects. We evaluate various spectrum sensing techniques, identifying their strengths, weaknesses, and challenges. With CR technology, wastage of spectrum resources can be minimized, and wireless communication efficiency can be enhanced. This paper offers an in-depth understanding of the latest developments in spectrum sensing in cognitive radio networks, along with guidance for future research and implementation endeavors.*

**Keywords:** *Cognitive radio, Spectrum sensing, Spectrum holes, Spectrum analysis, Spectrum Decision, Wireless Communication, Adaptive Spectrum Management, Radio Frequency Optimization*

**Abstrak.** Pemanfaatan spektrum gelombang radio telah meningkat pesat dalam beberapa dekade terakhir, namun tidak sejalan dengan ketersediaan frekuensi yang tersedia untuk pengguna. Fenomena ini diperparah oleh banyaknya pita frekuensi yang tidak digunakan oleh pemiliknya, yang menciptakan *spectrum holes* atau *white spaces*. Dalam konteks ini, teknologi *Cognitive radio* (CR) menjadi penting karena memungkinkan pengguna sekunder (*secondary user*) untuk mengakses dan menggunakan *spectrum holes* tanpa mengganggu pengguna primer (*primary user*). CR memungkinkan adaptabilitas perangkat radio dengan memanfaatkan *cognitive cycle*, dengan tahap utamanya adalah *Spectrum sensing*, di mana perangkat CR mencari *spectrum holes* dalam spektrum radio yang tersedia. Tahap berikutnya, *Spectrum analysis* dan *Spectrum Decision*, memungkinkan CR untuk mengoptimalkan penggunaan spektrum sesuai dengan kondisi

yang ditemui. Paper ini bertujuan untuk melakukan tinjauan singkat terhadap implementasi CR, khususnya pada aspek *spectrum sensing*. Kami mengevaluasi berbagai teknik *spectrum sensing*, mengidentifikasi kelebihan, kekurangan, serta tantangan yang dihadapi. Dengan teknologi CR, pemborosan sumber daya spektrum dapat diminimalkan dan efisiensi komunikasi nirkabel dapat ditingkatkan. Paper ini memberikan pemahaman mendalam tentang pengembangan terbaru dalam *spectrum sensing* pada jaringan radio kognitif, serta memberikan panduan bagi penelitian dan implementasi di masa depan.

**Kata kunci:** *Cognitive radio, Spectrum sensing, Spectrum holes, Spectrum analysis, Spectrum Decision, Wireless Communication, Adaptive Spectrum Management, Radio Frequency Optimization*

## PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, penggunaan spektrum gelombang radio telah meningkat secara signifikan. Namun, peningkatan tersebut tidak sejalan dengan ketersediaan frekuensi yang dapat diakses oleh para pengguna. Masalah ini semakin diperparah oleh adanya pita frekuensi yang telah dialokasikan secara sah atau tidak sah kepada lembaga tertentu (*primary user*) tetapi tidak dimanfaatkan secara penuh. Fenomena ini mengarah pada pemborosan sumber daya spektrum yang sangat berharga. (FCC, 2003)

Sebagian besar pita frekuensi yang dimiliki oleh *primary user* sering kali tidak digunakan di lokasi atau waktu tertentu, menciptakan apa yang dikenal sebagai "*spectrum holes*" atau "*white spaces*". Menurut sumber (Cichon et al., 2016; Ramani & Sharma, 2017; Yucek & Arslan, 2009), *spectrum holes* adalah pita frekuensi yang tidak digunakan oleh *primary user* di suatu lokasi dan waktu tertentu. Potensi ini bisa dimanfaatkan oleh pengguna sekunder (*secondary user*) dengan teknologi yang disebut radio kognitif (*cognitive radio, CR*). (FCC, 2003)

CR adalah konsep yang memungkinkan pemanfaatan spektrum frekuensi secara lebih efisien. Teknologi ini memungkinkan perangkat radio untuk mengakses pita frekuensi yang dialokasikan untuk *primary user* tanpa menyebabkan gangguan yang signifikan. *Federal Communication Commission* (FCC) mendefinisikan *cognitive radio* sebagai radio atau sistem yang mampu mendeteksi lingkungan elektromagnetik secara dinamis dan otonom serta mengubah parameter operasionalnya untuk memaksimalkan *throughput*, mengurangi interferensi, dan memfasilitasi akses sistem lain. (Ahmad, 2020; Ali & Hamouda, 2017; Awin et al., 2019; Khamayseh & Halawani, 2020; Mitola & Maguire, 1999; Ramani & Sharma, 2017)

Dengan kemampuan tersebut, *cognitive radio* dapat melakukan komunikasi real-time dengan menyesuaikan parameter operasionalnya sesuai dengan kondisi spektrum radio yang tersedia dan sedang digunakan oleh *secondary user*. CR memiliki beberapa tahapan operasional yang dikenal sebagai *cognitive cycle*, yang mendukung adaptabilitasnya (Masonta et al., 2013; Sansoy & Buttar, 2015; Yucek & Arslan, 2009). Tahapan ini meliputi:

- *Spectrum Sensing*: Pada tahap ini, perangkat CR mencari *spectrum holes* dalam spektrum radio di sekitarnya. (Akyildiz et al., 2011)
- *Spectrum Analysis*: Setelah menemukan *spectrum holes*, analisis dilakukan untuk menentukan karakteristik pita frekuensi tersebut, seperti kapasitas kanal dan kondisi kanal. (Amrutha & Karthikeyan, 2017)
- *Spectrum Decision*: Berdasarkan informasi yang diperoleh dari analisis spektrum, perangkat CR kemudian menyesuaikan parameter operasionalnya, termasuk kekuatan transmisi, untuk mengoptimalkan penggunaan spektrum. (Abdulsattar, 2012)

Pada paper ini, kami akan melakukan tinjauan dan perbandingan singkat terhadap beberapa publikasi yang telah membahas implementasi *cognitive radio*, khususnya pada aspek *spectrum sensing*. *Spectrum sensing* adalah langkah pertama dan paling krusial dalam *cognitive cycle*, karena keberhasilan tahap ini menentukan efektivitas dari seluruh sistem CR. Kami akan membahas berbagai teknik *spectrum sensing*, mengevaluasi kelebihan dan kekurangannya, serta mengidentifikasi tantangan dan solusi yang ada.

Dengan adanya teknologi *cognitive radio*, penggunaan spektrum frekuensi dapat dioptimalkan, mengurangi pemborosan sumber daya spektrum, dan meningkatkan efisiensi komunikasi nirkabel. Paper ini bertujuan untuk memberikan pemahaman mendalam tentang perkembangan terbaru dalam *spectrum sensing* pada jaringan radio kognitif, serta memberikan panduan bagi penelitian dan implementasi di masa depan.

## **COGNITIVE RADIO**

*Cognitive radio* (CR) adalah sebuah teknologi komunikasi nirkabel yang memungkinkan perangkat radio untuk secara dinamis mengakses dan menggunakan spektrum frekuensi radio yang tidak terpakai secara efisien. Konsep CR didasarkan pada ide bahwa spektrum radio adalah sumber daya yang terbatas dan sangat bernilai, dan bahwa sebagian besar spektrum sering kali tidak digunakan secara optimal. Oleh karena

itu, CR memungkinkan perangkat radio untuk mendeteksi, memantau, dan beradaptasi dengan lingkungan spektrum mereka secara real-time.

CR menggunakan teknik seperti *spectrum sensing* untuk mendeteksi frekuensi yang tidak terpakai atau "*spectrum holes*", kemudian menggunakan spektrum tersebut untuk transmisi data tanpa mengganggu pengguna yang sah atau pengguna primer (PU). Teknologi CR juga memungkinkan perangkat radio untuk berkomunikasi dan berkoordinasi satu sama lain untuk mengoptimalkan penggunaan spektrum, termasuk teknik *cooperative sensing* di mana beberapa perangkat bekerja sama dalam mendeteksi dan memantau spektrum.

### ***SPECTRUM SENSING***

Saat ini, spektrum frekuensi yang dimiliki oleh pemegang lisensi asli belum dimanfaatkan secara optimal. Akibatnya, terdapat "*spectrum holes*" yang dapat dimanfaatkan oleh pengguna sekunder, atau mereka yang tidak memiliki lisensi spektrum tersebut. Agar pengguna sekunder dapat memanfaatkan *spectrum holes* ini, diperlukan proses deteksi untuk mengidentifikasi spektrum yang tidak digunakan. Proses ini dikenal sebagai *spectrum sensing*.

*Spectrum sensing* adalah metode yang digunakan untuk memperoleh informasi tentang spektrum frekuensi yang tersedia. Informasi ini mencakup berbagai parameter seperti frekuensi, sudut, waktu, kode, dan ruang yang sedang digunakan. Melalui *spectrum sensing*, dapat diidentifikasi parameter-parameter penting dari kanal radio, serta informasi mengenai pengguna yang memanfaatkan spektrum tersebut, jenis modulasi yang digunakan, frekuensi operasional, dan daya pancar.

Berbagai teknik telah dikembangkan untuk melakukan *spectrum sensing*. Metode-metode yang umum digunakan termasuk *Energy detection (ED)*, *Matched filter Detection*, *Cyclostationarity-Based Detection (CSD)*, dan *Cooperative/Collaborative Spectrum Sensing (CSS)*. *Energy detection* adalah teknik yang paling sederhana dan paling sering digunakan karena tidak memerlukan pengetahuan tentang sinyal *primary user*. *Matched filter Detection*, di sisi lain, membutuhkan informasi yang lengkap tentang sinyal yang dideteksi untuk memberikan kinerja yang optimal. *Cyclostationarity-Based Detection* memanfaatkan sifat siklostasioner dari sinyal yang dipancarkan untuk mendeteksi keberadaan pengguna primer dengan akurasi tinggi. *Cooperative Spectrum*

*sensing* melibatkan beberapa perangkat CR yang bekerja sama untuk meningkatkan akurasi deteksi dengan mengurangi efek *multipath fading* dan *shadowing*.

Pada subbab berikutnya, akan dijelaskan secara mendetail berbagai teknik *spectrum sensing* ini, termasuk mekanisme kerja, kelebihan, dan kelemahannya masing-masing. Dengan memahami berbagai teknik ini, kita dapat mengoptimalkan penggunaan spektrum frekuensi yang ada, sehingga meningkatkan efisiensi komunikasi nirkabel.

### 1. *Energy detection (ED)*

*Energy detection (ED)*, juga dikenal sebagai *Radiometry*, adalah metode deteksi yang sering diandalkan dalam *spectrum sensing*. ED bekerja dengan mendeteksi daya sinyal tanpa memerlukan informasi rinci tentang sinyal pengguna primer (PU). Teknik ini tidak membutuhkan pencocokan informasi terkait PU, yang membuatnya lebih sederhana dalam implementasi.

Dalam praktiknya, ED memanfaatkan rasio *signal-to-noise* (SNR) untuk mendeteksi keberadaan sinyal dari PU. Proses deteksi ini melibatkan perbandingan output dari *energy detector* dengan ambang batas (*threshold*) yang telah ditetapkan. Karena tidak memerlukan pengetahuan khusus tentang sinyal PU, ED memiliki kompleksitas dan kebutuhan komputasi yang relatif rendah.

Penentuan *threshold* dalam ED sangat penting dan memerlukan kajian menyeluruh terhadap *noise* yang ada di area sekitar sebelum *threshold* dapat ditetapkan. Jika ED mampu menentukan nilai *threshold* secara otomatis berdasarkan variasi *noise* yang ada, maka metode ini disebut sebagai *blind detection*. Sebaliknya, jika ED memerlukan bantuan eksternal untuk menentukan *threshold*, maka disebut sebagai *semi-blind detection*.

Variasi *noise* dapat dihitung melalui pengukuran eksperimental pada sistem utama ketika dalam kondisi nonaktif. Metode ini memungkinkan ED untuk menyesuaikan *threshold* secara dinamis sesuai dengan kondisi lingkungan, meningkatkan akurasi deteksi.

Secara keseluruhan, *Energy detection* adalah metode yang efisien dan praktis untuk *spectrum sensing*, terutama dalam situasi di mana informasi rinci tentang sinyal PU tidak tersedia. Dengan memahami dan mengimplementasikan ED secara efektif, sistem radio

kognitif dapat memaksimalkan penggunaan spektrum yang ada, mengurangi interferensi, dan meningkatkan efisiensi komunikasi nirkabel.

Jika kita menganggap sinyal masukan adalah  $y(n)$  maka dapat dirumuskan menjadi berikut ini:

$$y(n) = x(n) + w(n)$$

Di mana  $x(n)$  adalah sinyal utama dari pengguna primer (PU) yang sedang melakukan transmisi, dan  $w(n)$  adalah *additive white Gaussian noise* (AWGN). Berdasarkan persamaan tersebut, keputusan dapat dibuat menggunakan persamaan berikut:

$$T_{ED} = \sum_N |y(n)|^2$$

Dimana  $N$  adalah interval dari pengamatan yang dilakukan. Untuk melihat ketersediaan dari pita frekuensi yang diawasi, kita dapat membandingkan hasil dari sinyal masukan dengan *threshold* yang telah ditentukan sebelumnya ( $\lambda_{ED}$ ). Deteksi yang dilakukan merupakan hasil pengambilan keputusan dari kedua hipotesis dibawah ini

$$H_0: y(n) = w(n); \text{ sinyal PU tidak tersedia}$$

$$H_1: y(n) = x(n) + w(n); \text{ sinyal PU tersedia}$$

Performa deteksi dari ED dapat menjadi beberapa klasifikasi, yaitu probabilitas terjadinya *false alarm* ( $P_f$ ) dan Probabilitas terjadinya deteksi sebenarnya ( $P_d$ ).  $P_f$  merupakan probabilitas eror yang terjadi akibat pita frekuensi terdeteksi sedang digunakan oleh PU sedangkan  $P_{md}$  (*probability of miss detection*) adalah probabilitas eror yang terjadi akibat pita frekuensi terdeteksi sedang tidak digunakan oleh siapapun. Dari segi PU,  $P_d$  harus sebesar mungkin agar tidak terjadi *interference*. Sedangkan pada segi SU,  $P_f$  yang sekecil mungkin diharapkan agar dapat menggunakan spektrum secara efisien.  $P_d$  dan  $P_f$  dapat didefinisikan menjadi persamaan berikut

$$P_d = P_r(T_{ED} > \lambda_{ED} | H_1)$$

$$P_f = P_r(T_{ED} > \lambda_{ED} | H_0)$$

Dari persamaan tersebut dapat dipilih *threshold* yang paling baik dari analisis antara  $P_d$  dan  $P_f$ . (Arjoune et al., 2018; Ayad Saad et al., 2020; Gupta et al., 2018; Li et al., 2020; Nastase et al., 2018; Patil et al., 2018; Smriti & Chhagan, 2018)

## 2. *Matched filter Detector*

*Matched filter* (MF) bertujuan untuk memaksimalkan rasio *signal-to-noise* (SNR) yang diterima dalam menghadapi *additive white Gaussian noise* (AWGN) dari spektrum. Karena kemampuannya untuk memaksimalkan karakteristik SNR, *matched filter* dianggap sebagai metode paling optimal. MF bekerja dengan mencocokkan informasi yang diketahui tentang pengguna primer (PU) dengan sinyal yang diterima. Oleh karena itu, pengguna sekunder (SU) perlu memiliki informasi mendetail mengenai parameter-parameter PU, tidak hanya mengenai informasi fisik yang digunakan oleh PU, tetapi juga struktur sinyal dari PU tersebut.

Proses *matched filter* dilakukan dengan melakukan korelasi silang antara informasi struktur dan fisik PU dengan sinyal yang diterima. Jika hasil korelasi ini menunjukkan nilai yang tinggi, maka dapat disimpulkan bahwa PU sedang menggunakan spektrum tersebut. Sebaliknya, jika hasil korelasi rendah, spektrum dianggap tersedia untuk digunakan oleh SU.

*Matched filter* memiliki performa yang sangat baik pada kondisi SNR rendah. Karena keunggulannya ini, *matched filter* sering digunakan untuk membantu deteksi yang dilakukan oleh metode *Energy detection* (ED) dalam situasi di mana sinyal lemah tidak lagi dapat dideteksi oleh ED. Meskipun *matched filter* memiliki tingkat komputasi yang tinggi dan kompleks, penggunaannya oleh SU sangat efektif dalam menangani kesalahan deteksi. Selain berfungsi sebagai pendeteksi keberadaan PU, *matched filter* juga digunakan untuk mengukur kekuatan daya sinyal PU yang melewati spektrum. Dengan informasi ini, SU dapat menyesuaikan daya transmisinya agar sesuai dengan daya interferensi minimal yang diizinkan.

Dalam sebuah penelitian yang membandingkan performa ED dengan *matched filter*, ditemukan bahwa *matched filter* memiliki toleransi yang lebih baik terhadap SNR rendah, mampu mendeteksi sinyal hingga pada tingkat SNR serendah 7 dB. Namun, *matched filter* mengalami penurunan performa saat terjadi fluktuasi *noise* yang

meningkat. Pada kondisi SNR rendah tertentu, deteksi yang dilakukan oleh *matched filter* dapat menjadi sangat buruk. Hal ini terjadi karena ambang batas (*threshold*) telah ditetapkan pada level tertentu, sehingga performa dapat ditingkatkan dengan menyesuaikan *threshold* yang ada. (Parvathy & Narayanan, 2020)

Dengan demikian, meskipun *matched filter* memiliki beberapa kekurangan, terutama dalam hal kompleksitas komputasi dan sensitivitas terhadap fluktuasi *noise*, manfaatnya dalam mendeteksi sinyal pada SNR rendah membuatnya sangat berharga dalam konteks *spectrum sensing*. Optimalisasi penggunaan *matched filter*, terutama dalam menyesuaikan *threshold* secara dinamis, dapat meningkatkan kinerja deteksi spektrum dan memungkinkan penggunaan spektrum yang lebih efisien oleh pengguna sekunder.

### 3. Cyclostationarity based detection (CSD)

Analisis *cyclostationary* adalah metode analisis yang tidak memerlukan pencocokan informasi-informasi dari pengguna primer (PU) yang memiliki spektrum yang ada. Metode ini fokus pada sinkronisasi antara frekuensi, fase, dan waktu yang digunakan oleh PU. Meskipun demikian, *cyclostationary* memiliki cara khusus untuk menyesuaikan waktu, fase, dan frekuensi yang digunakan oleh PU.

Sebagai contoh, dalam teknologi komunikasi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), setiap PU memiliki fitur khas yang melekat secara periodik. Fitur-fitur ini, seperti *autocorrelation* dari sinyal OFDM, dapat secara eksplisit menunjukkan korelasi struktural yang disebabkan oleh *cyclic prefix* (CP) yang digunakan oleh transmitter PU. Fitur-fitur *cyclostationary* ini seringkali terkait dengan *symbol rate*, *chip rate*, dan/atau *channel code* dari sinyal OFDM. Fitur-fitur ini tidak ditemukan pada sinyal interferensi atau *noise* stasioner yang dimiliki oleh PU.

Karena keberadaan fitur-fitur *cyclostationary* tersebut, metode deteksi ini sangat cocok digunakan pada *spectrum sensing* dengan SNR rendah. Hal ini disebabkan oleh kekebalan yang tinggi terhadap *noise* yang terjadi pada spektrum yang digunakan. Fitur-fitur *cyclostationary* memberikan kemampuan untuk membedakan sinyal PU dari *noise*, sehingga memungkinkan deteksi yang lebih akurat bahkan dalam kondisi lingkungan yang berisik.



Dengan menggunakan analisis *cyclostationary*, pengguna sekunder dapat dengan efektif mendeteksi kehadiran sinyal PU dan memanfaatkan spektrum yang tersedia tanpa menyebabkan gangguan yang tidak perlu. Ini membuat metode ini menjadi pilihan yang menarik dalam implementasi *spectrum sensing*, terutama dalam lingkungan di mana SNR rendah merupakan tantangan utama.

Karena sinyal *cyclostationary* memperlihatkan second order yang berulang, maka *Cyclic Autocorrelation Function* (CAF) pada frekuensi berulang  $\alpha$  dapat didefinisikan menjadi persamaan berikut dengan  $\tau$  merupakan lag value,  $\mathbf{E}$  merupakan expektasi, dan (\*) mengacu pada operasi konjugasi pada system.

$$Ry(\alpha, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{E} [y(n)y^*(n + \tau)]e^{-j\alpha n}$$

Implementasinya, CAF diestimasi berdasarkan sample yang telah diterima sebelumnya dan data yang telah diketahui sebelumnya terkait dengan  $\alpha$  dan/atau  $\tau$ . CAF tersebut digunakan sebagai pengambil keputusan secara statistic dengan *threshold* untuk menentukan apakah PU sedang menggunakan spektrum atau tidak.

#### 4. *Cooperative/Collaborative Sensing* (CSS)

Dalam metode-metode sebelumnya, diasumsikan bahwa sinyal dari pengguna primer (PU) yang masuk ke dalam *spectrum sensing* tidak mengalami *fading*, *shadowing*, atau ketidakpastian dari *noise* yang dapat mengganggu deteksi sinyal PU. Namun, dalam kenyataannya, terdapat masalah dan gangguan yang dapat terjadi pada PU. Ketika setiap pengguna sekunder (SU) melakukan *sensing* secara individu, seringkali terjadi miss detection karena hanya bergantung pada hasil dan informasi yang dimiliki oleh SU tersebut sendiri. Meningkatkan sensitivitas deteksi SU pada SNR rendah tidak cukup untuk mengatasi masalah ini.

Oleh karena itu, *cognitive radio* (CR) memanfaatkan konsep *cooperative sensing* antar SU untuk meningkatkan performa deteksi dan mengurangi batas sensitivitas serta waktu yang diperlukan untuk melakukan *sensing* pada spektrum. Konsep utama dari *cooperative sensing* adalah memanfaatkan keragaman spasial dalam pengamatan yang dilakukan oleh pengguna CR yang tersebar secara spasial.

*Cooperative sensing* dapat dibagi menjadi dua jenis: *centralized* dan *distributed*. Pada tipe *centralized cooperative sensing*, terdapat sebuah pusat kontrol bernama *fusion center* (FC) atau *master node* yang mengoordinasikan tiga langkah dari proses *cooperative sensing*. Pertama, FC menentukan satu pita frekuensi untuk dilakukan *sensing*, kemudian memberi instruksi kepada pengguna CR di sekitarnya untuk melakukan *sensing* lokal secara individu. Kedua, semua pengguna CR yang melakukan *sensing* lokal melaporkan hasil *sensing* mereka kepada FC melalui jalur khusus yang telah ditentukan sebelumnya. Ketiga, FC menggabungkan informasi hasil *sensing* yang diterima dari langkah sebelumnya untuk memutuskan keberadaan PU, lalu mengirimkan keputusan tersebut kembali kepada pengguna CR.

Di sisi lain, pada *distributed cooperative sensing*, koordinasi antara pengguna CR dilakukan langsung tanpa melalui FC. Informasi hasil *sensing* langsung ditukar antar pengguna CR.

*Cooperative sensing* konvensional biasanya hanya fokus pada satu pita frekuensi kecil dalam setiap iterasi *cooperative sensing*. Namun, jika proses ini diterapkan pada spektrum yang lebih lebar, dapat menimbulkan dampak besar pada sinkronisasi dan penundaan switching. Oleh karena itu, *cooperative sensing* dapat membagi spektrum yang lebih luas menjadi spektrum yang lebih sempit untuk setiap pengguna CR. Hal ini akan mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk melakukan *sensing* pada spektrum yang luas daripada melakukan *sensing* pada setiap pita frekuensi secara berurutan pada seluruh pengguna CR. Hasil dari *sensing* tersebut kemudian dikumpulkan di FC atau di antara pengguna CR, di mana keputusan akhir diambil untuk setiap pita frekuensi.

Dengan demikian, penggunaan *cooperative sensing* dalam *cognitive radio* membantu meningkatkan efisiensi penggunaan spektrum dan mengoptimalkan deteksi sinyal PU dalam lingkungan yang kompleks dan beragam.

## **IMPLEMENTASI SPECTRUM SENSING**

Pada *section* sebelumnya telah dijelaskan pengertian dari berapa metode *spectrum sensing*. Tiap-tiap metode tersebut memiliki kemampuan deteksi yang berbeda tergantung tujuan dari metode tersebut. Karena dibuat sesuai dengan kebutuhan maka metode tersebut memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing. Pada *section* ini dijelaskan

penelitian yang telah dilakukan untuk melakukan pengembangan pada *cognitive radio* terutama bagian *spectrum sensing*.

Paper berjudul "*A Study and Simulation of Spectrum sensing Schemes for Cognitive radio Networks*" dipresentasikan pada "*IEEE 7th International Conference on Smart Structures and Systems ICSSS 2020*" oleh G.T. Bharathy, Dr. V. Rajendran, dan Dr. M. Meena dari *Vels Institute of Science, Technology & Advanced Studies (VISTAS)*, Chennai, India. Penelitian ini mengevaluasi berbagai skema deteksi spektrum untuk Jaringan Radio Kognitif (CRNs) seperti *Energy Based Detection*, *Autocorrelation Based Detection*, *Euclidean Distance Based Detection*, dan saluran AWGN, guna mencapai Kualitas Layanan (QoS) dalam sistem komunikasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *Matched Filter Detection* lebih akurat dibandingkan *Energy detection*. Metode ini memungkinkan pengguna sekunder memanfaatkan spektrum tanpa mengganggu pengguna primer, meningkatkan efisiensi komunikasi pada pita berlisensi. Kebaruan paper ini terletak pada evaluasi komprehensif teknik deteksi spektrum dan usulan penggunaan komunikasi CR untuk mengoptimalkan penggunaan spektrum. Penelitian ini juga mengusulkan pengembangan lebih lanjut untuk aplikasi 5G. (Bharathy et al., 2020)

Artikel berjudul "*Algorithm for Evaluating Energy detection Spectrum sensing Performance of Cognitive radio MIMO-OFDM Systems*" oleh Josip Lorincz, Ivana Ramljak, dan Dinko Begusic, diterbitkan pada tahun 2021 di jurnal *Sensors*, mengembangkan algoritma untuk mengevaluasi kinerja deteksi spektrum menggunakan *Energy detection* (ED) dalam sistem *Cognitive radio MIMO-OFDM*. Penelitian ini bertujuan meningkatkan efisiensi deteksi spektrum pada sistem radio kognitif dengan teknologi MIMO dan OFDM. Melalui simulasi 10.000 iterasi Monte Carlo, penelitian ini mengevaluasi kinerja dengan mempertimbangkan faktor variasi derau dan adaptasi ambang batas. Hasil menunjukkan analisis ED dalam sistem dengan satu Pengguna Utama (PU) dan satu Pengguna Sekunder (SU) menggunakan metode *Squared Laplace Distribution Change* (SLC). Penelitian ini menyoroti pentingnya prioritas penggunaan spektrum oleh PU dan eksploitasi oleh SU berdasarkan *Spectrum sensing* (SS). Paper ini merekomendasikan metode SLC untuk ED dalam jaringan *Cognitive radio* (CR), terutama untuk skenario koeksistensi PU dan SU. Kebaruan paper ini terletak pada

evaluasi komprehensif metode ED dan usulan metode SLC yang menunjukkan peningkatan kinerja dalam deteksi spektrum. (Lorincz et al., 2021)

Pada paper berjudul "*Spectrum sensing in Cognitive radio Networks: Threshold Optimization and Analysis*" membahas permintaan yang meningkat untuk aplikasi dan layanan nirkabel serta masalah kelangkaan spektrum yang muncul akibatnya. Pengukuran oleh *Federal Communications Commission* (FCC) di Amerika Serikat menunjukkan bahwa pita frekuensi yang berlisensi kurang dimanfaatkan, dengan tingkat penggunaan serendah 90%. Dokumen ini memuat hasil simulasi untuk memverifikasi efektivitas algoritma yang diusulkan dalam karakterisasi kinerja deteksi spektrum pada jaringan radio kognitif. Algoritma yang diusulkan adalah metode deteksi berbasis pembelajaran mesin untuk menyelesaikan masalah deteksi spektrum, bergantung pada karakteristik sinyal dan algoritma klusterisasi *k-means* untuk klasifikasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma ini efektif dalam konteks kinerja deteksi spektrum di jaringan radio kognitif, yang dievaluasi menggunakan kurva *receiver operating characteristic* (ROC). Kurva ROC terdiri dari tiga tahap: fase *blurring*, fase *run-in motor*, dan fase *clearing*, yang penting untuk menilai kinerja *node* dalam jaringan. Penelitian ini juga mengoptimalkan parameter detektor energi untuk kinerja deteksi terbaik melalui studi simulasi. Kebaruan dari paper ini terletak pada penggunaan algoritma pembelajaran mesin dan klusterisasi untuk meningkatkan deteksi dan keandalan dalam tugas deteksi spektrum di jaringan radio kognitif. Penelitian ini diterbitkan pada tahun 2021 dan mencakup hasil-hasil yang memberikan pemahaman lebih mendalam tentang kinerja algoritma yang diusulkan. (Kockaya & Develi, 2020)

Paper lain membahas konsep Radio Kognitif (CR) dalam sistem komunikasi nirkabel. Sistem CR ini cerdas dan dapat menyesuaikan parameter seperti daya transmisi, frekuensi, dan strategi modulasi sesuai dengan lingkungannya. Dokumen ini juga menjelaskan penggunaan CR untuk mencapai tingkat kompetensi tertentu dalam domain terkait radio dan proses penambahan Pengguna Sekunder (SU) dalam slot frekuensi kosong berdasarkan kehadiran Pengguna Primer (PU) di spektrum. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB versi R2013a, dengan metode Monte Carlo (MC) sebagai dasar simulasinya. Hasil simulasi mengevaluasi kinerja detektor energi yang diterapkan pada pengguna sekunder untuk *spectrum sensing*. Model simulasi ini mengasumsikan *noise*

memiliki *mean nol* dan *white over bandwidth* yang dipertimbangkan, dengan sampel *noise* yang tidak berkorelasi. Sinyal yang diterima direpresentasikan dengan persamaan  $Y(n) = s(n) + w(n)$ , di mana  $s(n)$  adalah sinyal primer dan  $w(n)$  adalah *noise Gaussian* putih aditif (AWGN). Tujuan simulasi ini adalah untuk mengamati sinyal sampel  $x(t)$  dan kemudian menggunakan aturan untuk memutuskan hipotesis yang benar berdasarkan statistik uji yang lebih besar atau lebih kecil dari nilai ambang. Kesimpulan dokumen ini menyoroti pentingnya meningkatkan efisiensi penggunaan spektrum karena meningkatnya permintaan untuk kecepatan data yang lebih tinggi, kualitas layanan yang lebih baik, dan kapasitas yang lebih besar. Teknik Deteksi Energi dibahas secara rinci dalam paper ini sebagai cara untuk mengatasi masalah ini. (Zhai Xuping & Pan Jianguo, 2007)

Paper yang berjudul "Kinerja *Energy detection Spectrum sensing* untuk *Cognitive radio* Menggunakan GNU Radio" ini diterbitkan dalam "Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi" oleh Hudaya Muna Putra, Sigit Basuki Wibowo, Dyonisius Dony Ariananda, dan Wahyu Dewanto. Diterbitkan pada tahun 2023, paper ini membahas kinerja pendeteksian spektrum menggunakan metode *energy detection* untuk radio kognitif (CR) dengan menggunakan platform GNU Radio. Para penulis menyoroti masalah kelangkaan spektrum akibat meningkatnya aplikasi komunikasi nirkabel dan mengusulkan CR sebagai solusi, yaitu sistem radio cerdas yang mampu mendeteksi lingkungan, menemukan celah spektrum, dan menyesuaikan parameter transmisi untuk memanfaatkan celah tersebut. Implementasi dilakukan dengan menggunakan metode *periodogram* untuk memperkirakan *power spectral density (PSD)* dan membandingkannya dengan ambang batas. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pendeteksian spektrum berbasis *energy detection* dapat mendeteksi keberadaan Pengguna Primer (PU) ketika SNR cukup tinggi. Analisis performa ini didasarkan pada kurva ROC yang menghitung probabilitas deteksi (PD) dan probabilitas alarm palsu (PFA). Studi ini memberikan kontribusi penting dengan menyediakan pendekatan praktis untuk pendeteksian spektrum, yang penting untuk alokasi dan pemanfaatan frekuensi spektrum yang efisien dalam era aplikasi nirkabel yang berkembang pesat. Paper ini menekankan pentingnya modul pendeteksian spektrum dalam operasi sistem CR dan menunjukkan potensi metode ini dalam mengatasi tantangan kelangkaan spektrum. (Hudaya Muna Putra et al., 2022)

Paper berjudul "*Study on Periodogram and Correlogram-Based Spectrum sensing Implementation on GNU Radio*" dipresentasikan pada konferensi "2022 1st International Conference on Information System & Information Technology" oleh Rahardian Luthfi Prasetyo, Sigit Basuki Wibowo, dan Dyonisius Dony Ariananda dari Universitas Gadjah Mada, Indonesia. Paper ini membahas implementasi pendeteksian spektrum pada jaringan radio kognitif menggunakan GNU Radio, dengan fokus pada metode *periodogram* dan korelogram untuk pendeteksian spektrum berbasis energi (ED-SS). Para penulis mengembangkan fungsionalitas baru dalam GNU Radio menggunakan blok *Python* tersemat untuk mendukung metode ini, yang penting untuk mendeteksi spektrum berlisensi yang tidak digunakan oleh pengguna sekunder (SUs). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode korelogram memberikan kinerja deteksi yang lebih baik dengan variasi frekuensi yang lebih rendah dibandingkan dengan metode *periodogram*. Hal ini dibuktikan dengan tingkat deteksi yang lebih rendah dan tingkat alarm palsu yang lebih rendah, seperti yang ditunjukkan dalam plot *receiver operating characteristic*. Paper ini menyimpulkan bahwa pendekatan korelogram menawarkan peningkatan signifikan dalam aplikasi pendeteksian spektrum dibandingkan dengan *periodogram*. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada peningkatan fungsionalitas GNU Radio dan menunjukkan keandalan metode korelogram untuk pendeteksian spektrum di sistem radio kognitif, yang penting untuk pemanfaatan spektrum yang lebih efisien dalam komunikasi nirkabel. (Prasetyo et al., 2022)

Paper berjudul "*Comparative Study of Energy detection and Matched filter Based Spectrum sensing Techniques*" oleh Parvathy A dan Gayathri Narayanan dari Amrita Vishwa Vidyapeetham, India, dipublikasikan pada tahun 2022. Penelitian ini membahas perbandingan teknik pendeteksian spektrum dalam teknologi radio kognitif, khususnya metode *Energy detection* dan *Matched filter* yang penting untuk mengidentifikasi spektrum kosong. Paper ini dimulai dengan menyoroti masalah kelangkaan spektrum akibat kebijakan alokasi spektrum yang statis, serta menekankan pentingnya akses spektrum dinamis sebagai solusi. Penulis menjelaskan metrik kinerja teknik pendeteksian spektrum, seperti probabilitas deteksi (PD) dan probabilitas alarm palsu (PFA), serta mengusulkan penggunaan ambang dinamis untuk meningkatkan kinerja deteksi. Hasil eksperimen dari simulasi yang dilakukan di *Matlab* dan *Verilog* menunjukkan bahwa metode *Matched filter* unggul pada tingkat SNR rendah meskipun lebih kompleks dalam

implementasi. Penelitian ini menyimpulkan dengan menyarankan eksplorasi teknik penetapan ambang dan metode optimasi untuk mendefinisikan aturan keputusan optimal bagi detektor pendeteksian spektrum. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada perbandingan komprehensif antara dua teknik pendeteksian utama dan usulan peningkatan kinerja deteksi melalui penggunaan ambang dinamis, yang berkontribusi pada kemajuan teknologi radio kognitif. (Parvathy & Narayanan, 2020)

Paper berjudul "*FPGA Based Energy detection Spectrum sensing for Cognitive radios under Noise Uncertainty*" menyajikan studi komprehensif mengenai penginderaan spektrum berbasis FPGA untuk radio kognitif di bawah ketidakpastian *noise*. Penulis meneliti penggunaan penginderaan spektrum dalam sistem radio kognitif yang penting untuk memungkinkan pengguna sekunder mengakses spektrum yang tidak terpakai tanpa mengganggu pengguna primer. Fokus utama adalah pada teknik deteksi energi (ED) dan kinerjanya di bawah *noise* aditif putih *Gaussian* (AWGN) dan berbagai jenis modulasi *M-ary*, dengan mempertimbangkan tantangan ketidakpastian *noise* dan dinding rasio sinyal-ke-*noise* (SNR). Studi dimulai dengan pengenalan radio kognitif (CR) dan pentingnya dalam mengatasi kelangkaan spektrum, kemudian membahas teknik penginderaan spektrum non-kooperatif dan kooperatif serta kelebihan dan keterbatasan masing-masing. ED dianggap penting karena merupakan teknik semi-blind yang tidak memerlukan pengetahuan sebelumnya tentang sinyal pengguna primer. Analisis terperinci disajikan mengenai metrik kinerja ED seperti probabilitas deteksi ( $P_d$ ), alarm palsu ( $P_f$ ), dan deteksi yang terlewat ( $P_m$ ) di berbagai kondisi, serta dampak ketidakpastian *noise* pada metrik ini. Implementasi ED dilakukan baik di domain waktu maupun frekuensi pada kit FPGA Xilinx Spartan-3E menggunakan bahasa Verilog. Hasilnya menunjukkan bahwa ED layak digunakan untuk penginderaan spektrum CR non-kooperatif di saluran AWGN dan di bawah ketidakpastian *noise*. Implementasi FPGA berhasil, menawarkan wawasan praktis mengenai penginderaan spektrum dalam radio kognitif. Paper ini memberikan kontribusi penting bagi peneliti dan praktisi di bidang komunikasi nirkabel dan teknologi radio kognitif. (Fouda et al., 2018)

## KESIMPULAN DAN SARAN

Pemanfaatan spektrum gelombang radio yang semakin meningkat tidak sejalan dengan ketersediaan frekuensi yang memadai, mengakibatkan munculnya *spectrum holes* atau *white spaces*. Teknologi *Cognitive radio* (CR) hadir sebagai solusi dengan memungkinkan pengguna sekunder mengakses spektrum yang tidak digunakan tanpa mengganggu pengguna primer. CR beroperasi melalui siklus kognitif yang adaptif, dengan tahap utama berupa *Spectrum sensing* untuk mendeteksi *spectrum holes*. Tahap lanjutan, yaitu *Spectrum analysis* dan Spectrum Decision, memungkinkan optimalisasi penggunaan spektrum berdasarkan kondisi yang ada.

Dalam paper ini, kami telah melakukan tinjauan menyeluruh terhadap implementasi CR, khususnya pada aspek *spectrum sensing*. Berbagai teknik *spectrum sensing* dievaluasi untuk mengidentifikasi kelebihan, kekurangan, dan tantangan yang ada. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa meskipun beberapa teknik *spectrum sensing* efektif dalam mendeteksi *spectrum holes*, masih terdapat tantangan dalam hal akurasi deteksi, ketahanan terhadap *noise*, dan kompleksitas implementasi.

Dengan adanya teknologi CR, pemborosan sumber daya spektrum dapat diminimalkan dan efisiensi komunikasi nirkabel dapat ditingkatkan. Paper ini tidak hanya memberikan pemahaman mendalam tentang perkembangan terbaru dalam *spectrum sensing* pada jaringan radio kognitif, tetapi juga menyediakan panduan bagi penelitian dan implementasi di masa depan. Diharapkan bahwa temuan dan rekomendasi dalam paper ini akan mendorong inovasi lebih lanjut dan penerapan yang lebih luas dari teknologi CR untuk mengatasi masalah kelangkaan spektrum.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ingin menyampaikan apresiasi yang tulus kepada rekan-rekan sesama penulis atas bantuan dan bimbingan yang tak ternilai selama proses penulisan paper ini. Kolaborasi yang solid dan diskusi yang konstruktif telah memberikan kontribusi besar terhadap kualitas dan keberhasilan penelitian ini. Kami juga berterima kasih kepada pihak penerbit jurnal yang telah memberikan kesempatan untuk menerbitkan karya kami. Dukungan dan kerjasama dari semua pihak sangat kami hargai dan telah menjadi pendorong utama dalam menyelesaikan penelitian ini. Kami berharap bahwa hasil



penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang komunikasi nirkabel.

## DAFTAR REFERENSI

- Abdulsattar, M. A. (2012). *Energy detection Technique for Spectrum sensing in Cognitive radio: A Survey*. *International Journal of Computer Networks & Communications*, 4(5), 223–242. <https://doi.org/10.5121/ijcnc.2012.4514>
- Ahmad, B. I. (2020). *A Survey of Wideband Spectrum sensing Algorithms for Cognitive radio Networks and Sub-Nyquist Approaches*. <http://arxiv.org/abs/2001.02574>
- Akyildiz, I. F., Lo, B. F., & Balakrishnan, R. (2011). Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey. *Physical Communication*, 4(1), 40–62. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2010.12.003>
- Ali, A., & Hamouda, W. (2017). Advances on Spectrum sensing for Cognitive radio Networks: Theory and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 1277–1304. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2631080>
- Amrutha, V., & Karthikeyan, K. V. (2017). Spectrum sensing methodologies in cognitive radio networks: A survey. *Proceedings of IEEE International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology, ICIEEIMT 2017, 2017-Janua(978), 306–310*. <https://doi.org/10.1109/ICIEEIMT.2017.8116855>
- Arjoune, Y., Mrabet, Z. El, Ghazi, H. El, & Tamtaoui, A. (2018). Spectrum sensing: Enhanced energy detection technique based on noise measurement. *2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 828–834. <https://doi.org/10.1109/CCWC.2018.8301619>
- Awin, F. A., Alginahi, Y. M., Abdel-Raheem, E., & Tepe, K. (2019). Technical Issues on Cognitive radio-Based Internet of Things Systems: A Survey. *IEEE Access*, 7, 97887–97908. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929915>
- Ayad Saad, M., HAli, M., Mahdi Hashim, M., Hussein Ali, A., T, M. S., Hussein Ali, M., Hashim, M. M., Bin Ismail, M., & Ali, A. H. (2020). Spectrum sensing and energy detection in cognitive networks. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 17(1), 465–472. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i1.pp465-472>
- Bharathy, G. T., Rajendran, V., Tamilselvi, T., & Meena, M. (2020). A Study and Simulation of Spectrum sensing Schemes for Cognitive radio Networks. *2020 7th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*, 7, 1–11. <https://doi.org/10.1109/ICSSS49621.2020.9202296>
- Cichon, K., Kliks, A., & Bogucka, H. (2016). Energy-Efficient Cooperative Spectrum sensing: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(3), 1861–1886. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2553178>

- FCC. (2003). *Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive radio Technologies*. Federal Communications Commission. <https://www.fcc.gov/document/facilitating-opportunities-flexible-efficient-and-reliable-spectrum-1>
- Fouda, M. A., Eldien, A. S. T., & Mansour, H. A. K. (2018). FPGA based *energy detection spectrum sensing for cognitive radios* under noise uncertainty. *Proceedings of ICCES 2017 12th International Conference on Computer Engineering and Systems*, 2018-Janua, 584–591. <https://doi.org/10.1109/ICCES.2017.8275374>
- Gupta, I., Hari, A., & Sahu, O. P. (2018). Hardware Implementation of *Energy detection Scheme in Cognitive radio Networks*. *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 575–577. <https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8675002>
- Hudaya Muna Putra, Sigit Basuki Wibowo, Dyonisius Dony Ariananda, & Wahyu Dewanto. (2022). Performance of *Energy detection Spectrum sensing for Cognitive radio* Using GNU Radio. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi*, 11(3), 199–207. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v11i3.3757>
- Khamayseh, S., & Halawani, A. (2020). Cooperative *Spectrum sensing in Cognitive radio Networks: A Survey on Machine Learning-based Methods*. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2020(3), 36–46. <https://doi.org/10.26636/jtit.2020.137219>
- kockaya, K., & Develi, I. (2020). *Spectrum sensing in cognitive radio networks: threshold optimization and analysis*. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020(1), 255. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01870-7>
- Li, H., Hu, Y., & Wang, S. (2020). Signal Detection Based on Power-Spectrum Sub-Band Energy Ratio. *Electronics*, 10(1), 64. <https://doi.org/10.3390/electronics10010064>
- Lorincz, J., Ramljak, I., & Begusic, D. (2021). Algorithm for Evaluating *Energy detection Spectrum sensing Performance of Cognitive radio MIMO-OFDM Systems*. *Sensors*, 21(20), 6881. <https://doi.org/10.3390/s21206881>
- Masonta, M. T., Mzyece, M., & Ntlatlapa, N. (2013). Spectrum Decision in *Cognitive radio Networks: A Survey*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3), 1088–1107. <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.111412.00160>
- Mitola, J., & Maguire, G. Q. (1999). *Cognitive radio: making software radios more personal*. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13–18. <https://doi.org/10.1109/98.788210>
- Nastase, C.-V., Martian, A., Vladeanu, C., & Marghescu, I. (2018). *Spectrum sensing Based on Energy detection Algorithms Using GNU Radio and USRP for Cognitive radio*. *2018 International Conference on Communications (COMM)*, 381–384. <https://doi.org/10.1109/ICComm.2018.8430143>
- Parvathy, A., & Narayanan, G. (2020). Comparative Study of *Energy detection and Matched filter Based Spectrum sensing Techniques*. *2020 12th International*

- Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, 147–153. <https://doi.org/10.1109/CICN49253.2020.9242609>
- Patil, R. B., Kulat, K. D., & Gandhi, A. S. (2018). SDR Based *Energy detection Spectrum sensing* in *Cognitive radio* for Real Time Video Transmission. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2018, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/2424305>
- Prasetyo, R. L., Wibowo, S. B., & Ariananda, D. D. (2022). Study on *Periodogram* and *Correlogram-Based Spectrum sensing* Implementation on GNU Radio. *2022 1st International Conference on Information System and Information Technology, ICISIT 2022*, 415–420. <https://doi.org/10.1109/ICISIT54091.2022.9872775>
- Ramani, V., & Sharma, S. K. (2017). Cognitive radios: A survey on *spectrum sensing*, security and spectrum handoff. *China Communications*, 14(11), 185–208. <https://doi.org/10.1109/CC.2017.8233660>
- Sansoy, M., & Buttar, A. S. (2015). *Spectrum sensing* algorithms in *Cognitive radio*: A survey. *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2015.7226181>
- Smriti, & Chhagan, C. (2018). Double *Threshold-Based Energy detection Spectrum sensing* Scheme by Considering the *Sensing History* in Confusion Region. *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 518–521. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2018.8474248>
- Yucek, T., & Arslan, H. (2009). A survey of *spectrum sensing* algorithms for *cognitive radio* applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1), 116–130. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090109>
- Zhai Xuping, & Pan Jianguo. (2007). Energy-detection based *spectrum sensing* for *cognitive radio*. *IET Conference on Wireless, Mobile and Sensor Networks 2007 (CCWMSN07)*, 2007(533 CP), 944–947. <https://doi.org/10.1049/cp:20070306>