

PEMODELAN KANAL UNTUK *WIRELESS CAPSULE ENDOSCOPY (WCE)*

CHANNEL MODEL FOR WIRELESS CAPSULE ENDOSCOPY (WCE)

Niantiar Widi Astari^{1,2}, Khoirul Anwar^{1,2}, and Husneni Mukhtar²

¹The University Center of Excellence for Advanced Intelligent Communications (AICOMS)

²Fakultas Teknik Elektro, Telkom University

niantiarawidi@student.telkomuniversity.ac.id, anwarkhoirul@telkomuniversity.ac.id,
husnaenimukhtar@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Teknologi *wireless* semakin berkembang pesat di berbagai bidang yang salah satu implementasinya berada di bidang kesehatan. *Wireless capsule endoscopy (WCE)* diciptakan untuk mempermudah pemeriksaan saluran pencernaan manusia. Kanal komunikasi untuk WCE tidak bisa disamakan dengan medium udara yang dipakai dalam sistem komunikasi terrestrial. Belum diketahuinya model kanal untuk WCE, terutama bagi orang-orang di Indonesia, menyulitkan pengembangan WCE.

Paper ini bertujuan untuk memodelkan kanal WCE sebagai langkah awal pengembangan WCE di Indonesia. *Paper* ini menyajikan model kanal *ultra wideband (UWB)* dengan rentang frekuensi 3.4–4.8 GHz. UWB memiliki potensi besar untuk dijadikan band operasi pada model kanal ini karena konsumsi daya yang rendah, tingkat transmisi yang rendah, dan lokalisasi yang akurat.

Paper ini menghasilkan: (i) usulan model kanal WCE yang memiliki 9 *path* yang diharapkan mewakili kanal WCE untuk transmisi dari dalam tubuh, (ii) *outage performances* kanal WCE yang bisa digunakan sebagai referensi kinerja WCE secara teori, dan (iii) kinerja praktis *bit error rate (BER)* dan *frame error rate (FER)* dengan *channel coding* sederhana, yaitu *repetition codes* dan *convolutional codes*, yang juga digunakan sebagai validasi untuk model kanal yang diusulkan. Hasil *Paper* ini diharapkan mampu menjadi referensi pengembangan WCE, terutama di Indonesia.

Kata kunci: WCE, model kanal, *outage performances*, *repetition codes*.

Abstract

Wireless technology is growing rapidly in various fields, of which one of implementations is in the health sector. Wireless capsule endoscopy (WCE) is developed to facilitate examination in the human digestive tract. Communication channels for WCE is slightly different compared to the air medium commonly used in terrestrial communication systems. Unknown WCE channel model, especially for people in Indonesia, may cause difficulties to the development of the WCE.

This paper aims to model the WCE channel using the New York University Simulator (NYUSIM) as the initial step to develop the WCE prior to the real-field experiment. This paper presents ultra-wideband (UWB) channel models with a frequency range of 3.4–4.8 GHz. UWB has great potential for this channel model due to low power consumption, low transmission rates, and accurate localization.

The results of this paper are: (i) proposed WCE channel model has 9 paths which are expected to represent WCE channels for transmission from within the body, (ii) WCE channel outage performances as WCE performance in theory, and (iii) practical performance bit error rate (BER) and frame error rate (FER) with simple channel coding, namely repetition codes and convolutional codes, as validation for the proposed channel model. The results of this paper are expected to be a reference for WCE development, especially in Indonesia.

The results of this paper are: (i) the proposed WCE channel model having 9 paths, which are expected to represent WCE channels, (ii) WCE channel outage performances as the theoretical WCE performances, and (iii) practical bit error rate (BER) and frame error rate (FER) performances with a simple channel coding scheme of repetition and convolutional codes to validate the proposed channel model.

Keywords: WCE, channel model, outage performances, repetition codes.

1. Pendahuluan

Penyakit saluran pencernaan menempati 10 besar terbanyak pada pasien rawat jalan di seluruh Indonesia. Selain itu, penyakit saluran pencernaan masih menempati urutan ke-5 penyebab kematian terbanyak pada pasien rawat inap. Salah satu modalitas utama untuk diagnosis dan pengobatan pada saluran pencernaan adalah dengan endoskopi saluran pencernaan [1]. Teknologi nirkabel semakin berkembang pesat dan kini telah sampai pada era dimana banyak unsur yang dapat terhubung dan termonitor secara jarak jauh. Jaringan yang secara khusus ditempatkan



Sumber: <https://www.dicardiology.com/article/capsule-endoscopy-systems-safety-patients-cardiovascular-implants>

Gambar 1 *Wireless Capsule Endoscopy (WCE).*

pada tubuh manusia disebut *wireless body area network* (WBAN) [2]. Pada bidang kesehatan, WBAN membawa pengaruh dalam memudahkan memonitor tubuh manusia dan mentransmisikannya melalui media nirkabel. Di bawah standar IEEE 802.15.6, WBAN bekerja dengan prinsip konsumsi daya rendah, *bit rate* rendah, dan biaya yang rendah [3].

Endoskopi adalah salah satu prosedur pemeriksaan medis untuk melihat kondisi saluran pencernaan menggunakan alat endoskop yang merupakan alat berbentuk seperti selang elastis dengan lampu dan kamera optik di ujungnya. Kamera akan menangkap setiap objek yang dituju dan ditampilkan pada monitor [4]. Seiring dengan perkembangan zaman, endoskopi saluran pencernaan mengalami kemajuan pesat. Bila awalnya teknik memasukkan alat semacam kamera hanya terbagi dua, gastroskopi dan kolonoskopi, kini sudah ada teknik bernama kapsul endoskopi [5]. Kapsul endoskopi adalah prosedur merekam gambar pada saluran pencernaan. Kapsul tersebut berukuran seperti pil dan terdiri dari sebuah kamera kecil, antena berukuran kecil, dan baterai. Gambar 1 menunjukkan penampang umum dari kapsul endoskopi di dunia kesehatan. Setelah pasien menelan kapsul tersebut, kamera yang berada di kapsul merekam gambar bagian dalam saluran pencernaan untuk mengetahui masalah di wilayah usus kecil yang tidak dapat dilihat oleh jenis endoskopi lainnya. Jenis pemeriksaan ini sering dilakukan untuk mencari sumber pendarahan atau penyebab sakit perut [6].

Jaringan yang ada di dalam tubuh manusia merupakan suatu material dielektrik yang memiliki suatu nilai permitivitas dan konduktivitas. Hal ini disebabkan jaringan manusia merupakan sekumpulan struktur sel dan ekstraselular yang memiliki ion-ion yang bermuatan listrik. Oleh karena itu nilai permitivitas suatu jaringan manusia berbeda karena komposisi dari larutan ionik dan struktur penunjang lainnya [7]. Banyak material di dalam tubuh memiliki sifat yang tidak konstan akibat paparan frekuensi yang bervariasi. Sifat material yang bervariasi ini disebut dengan dispersi. Jaringan tubuh manusia memiliki beberapa sifat dispersi yang berbeda berdasarkan rentang frekuensi tertentu [8].

Teknologi *wireless capsule endoscopy* (WCE) menggunakan model kanal *ultra-wideband* (UWB) dalam frekuensi 3.4–4.8 GHz. Pada frekuensi ini parameter lingkungan sekitar sangat berpengaruh dalam pemodelan terhadap propagasi gelombang. Kanal adalah media antara pengirim dan penerima yang perlu dimodelkan sehingga menghasilkan model sistem komunikasi untuk meminimalkan kesalahan *error* dan memaksimalkan transmisi informasi (*bit rate*). Media untuk kanal berupa kawat tembaga, kabel koaksial, udara (radio), atau serat optik. Kanal di tubuh manusia berbeda dengan kanal transmisi tersebut karena struktur jaringan tubuh manusia yang berbeda sehingga tidak dapat disamakan dengan kanal di udara. Setiap kanal memberikan redaman atau *loss* sehingga daya sinyal berkurang dengan peningkatan jarak.

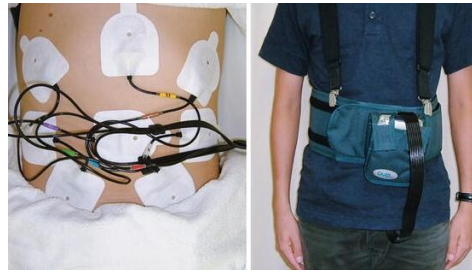
Model kanal biasanya dinyatakan dalam *power delay profile* (PDP), yaitu sebuah *profile* yang menunjukkan *power* untuk *delay* yang berbeda. Jika model kanal untuk beberapa kondisi tubuh manusia diketahui, parameter bisa diatur mengikuti keadaan tubuh manusia. Oleh karena itu, pemodelan kanal sangat membantu dalam perancangan sistem komunikasi dengan implementasinya secara optimal.

2. Konsep Dasar

A. *Wireless Capsule Endoscopy* (WCE)

Endoskopi adalah prosedur untuk melihat, mendeteksi, dan mendiagnosis organ dalam secara detail menggunakan alat yang disebut endoskop. Cara endoskopi yang selama ini dilakukan adalah dengan memasukkan selang panjang yang dilengkapinya kamera melalui mulut dan sedikit menyulitkan tim medis untuk melakukan diagnosis karena keterbatasan kondisi pasien. Kini endoskopi dapat dilakukan dengan cara menelan kapsul yang sudah dilengkapi dengan kamera tanpa menimbulkan rasa sakit [9]. *Wireless Capsule Endoscopy* pertama kali diperkenalkan oleh Iddan ini berisi kamera ini akan bergerak mengikuti gerak peristaltik di sepanjang saluran pencernaan dan mengambil ribuan gambar yang langsung ditransmisikan ke sebuah *receiver* yang telah dipasang di tubuh pasien.

Sabuk perekam data yang dikenakan oleh pasien di sekitar pinggang, menerima sinyal yang dikirimkan oleh



Sumber: https://doi.org/10.1007/978-4-431-54352-7_3

Gambar 2 Receiver pada sistem WCE.

kapsul melalui serangkaian sensor yang ditempatkan di tubuh manusia. Perekam data yang digunakan adalah unit yang dioperasikan dengan baterai seukuran *walkman* yang menerima data yang dikirimkan oleh kapsul. Ini terdiri dari *receiver*, modul processor, dan *hard disk drive* untuk menyimpan data. Baterai yang digunakan untuk operasi ini tahan hingga 2 jam mengikuti waktu gerak peristaltik yang dibutuhkan mulai dari menelan hingga keluarnya WCE dari tubuh manusia. Gambar 2 menunjukkan situasi *link* antara *transmitter* dan *receiver* pada sistem WCE.

B. Modulasi Binary Phase Shift Keying

Modulasi *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) menghasilkan simbol yang bernilai riil. Menurut [10], teori BER modulasi BPSK pada kanal *multipath fading* dinyatakan sebagai

$$P_{b,BPSK,fading} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{E_b/N_0}}} \right]. \quad (1)$$

Pada modulasi BPSK, bit urutan ke- i pada $b(i)$ dinyatakan menjadi simbol urutan ke- i dengan

$$x(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 - 2b(i))]. \quad (2)$$

C. Repetition Codes

Dalam teori pengkodean, *repetition codes* adalah salah satu kode koreksi *error* paling dasar. Konsep utama dari *repetition codes* adalah mengulangi setiap bit informasi sesuai dengan jumlah pengulangan yang telah ditetapkan. *Coding rate R* pada *repetition codes* dinyatakan dengan

$$R = \frac{k}{n}, \quad (3)$$

dengan k adalah jumlah bit informasi dan n adalah banyaknya bit informasi yang ditambah dengan bit *parity*. *Bipartite graph* untuk *repetition codes* ditunjukkan pada Gambar 3.

Generator matriks dari *repetition codes* menurut [11] adalah

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

dengan bit pertama adalah bit informasi dan 2 bit lainnya adalah bit *parity* dengan asumsi *repetition codes* menggunakan $R = 1/3$.

Jika bit informasi dinyatakan dengan

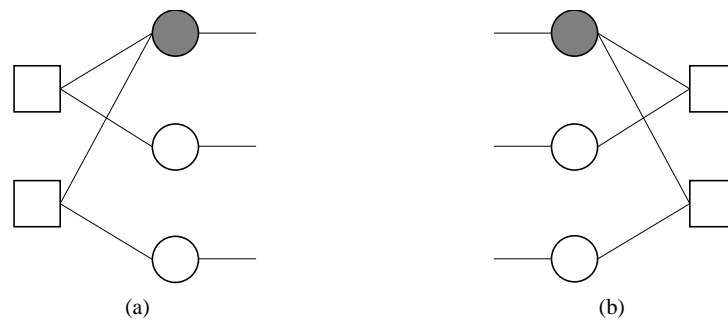
$$\mathbf{m}_n = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ \cdots \ m_{n-1} \ m_n], \quad (5)$$

maka dapat diperoleh *codeword* yang dinyatakan dengan operasi matriks

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{m}_n \cdot \mathbf{G}. \quad (6)$$

Matriks *parity check* untuk *repetition codes* dengan \mathbf{G} di (4) dinyatakan dengan

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$



Gambar 3 Bipartite graph untuk repetition codes di sisi (a) pengirim dengan matrix G pada (4) dan (b) penerima dengan matrix H pada (7).

D. Convolutional Codes

Convolutional codes merupakan salah satu jenis *channel coding* sederhana yang dapat mendeteksi dan memperbaiki kesalahan secara otomatis. *Convolutional codes* beroperasi pada bit *stream* yang terus menerus dan tidak dipartisi ke dalam blok terpisah. *Convolutional codes memory 1* adalah jenis code paling sederhana, tetapi dengan teknik *iterative*, *convolutional codes memory 1* pun bisa dibuat menjadi *strong codes* seperti aplikasi pada *relay* di [12]. Gambar 4 menunjukkan struktur *convolutional codes* dengan polinomial $3[7, 3, 5]_2$ dan *coding rate* $R = 1/3$ yang digunakan dalam *paper* ini.

E. Power Delay Profile (PDP)

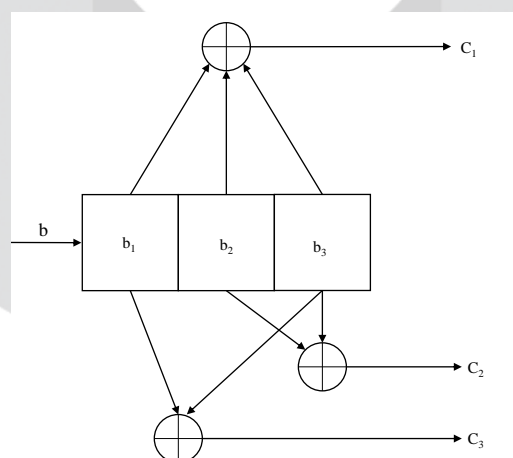
PDP merepresentasikan daya rata-rata akibat *multipath delay* pada kanal. *Multipath delay* atau biasa disebut *time delay* adalah waktu perjalanan antara kedatangan dengan yang diterima. Gambar 5 menunjukkan contoh PDP untuk kanal *narrowband* dan *broadband*.

E.1 Maximum Excess Delay

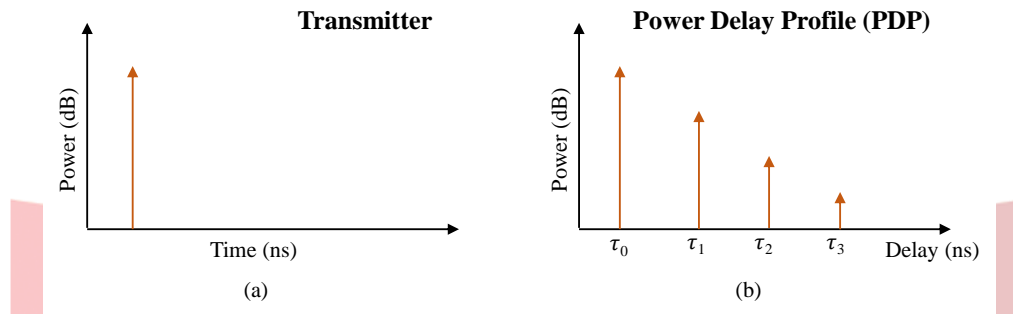
Maximum excess delay adalah perbedaan waktu yang dihitung dari sinyal terima pertama kali sampai sinyal terakhir dengan memperhatikan daya di atas sensitivitas *receiver* (*threshold*). *Maximum excess delay* didefinisikan sebagai $T_x - T_0$ dengan T_0 sinyal terima yang pertama kali datang dan T_x adalah *maximum delay*. Nilai T_x kadang disebut penyebaran berlebih dari PDP.

E.2 Mean Excess Delay

Mean excess delay menunjukkan *delay* yang sebanding dengan daya sinyal yang diterima dari keseluruhan *delay* dalam PDP. *Mean excess delay* $\bar{\tau}$ dapat dihitung dengan



Gambar 4 Contoh struktur *convolutional codes* dengan polinomial $3[7, 3, 5]_2$ dengan $R = 1/3$.



Gambar 5 PDP untuk: (a) narrowband dan (b) broadband.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum a_n^2 \cdot \tau_n}{\sum a_n^2} = \frac{\sum P(\tau_n) \cdot \tau_n}{\sum P(\tau_n)}, \quad (8)$$

dengan a_n adalah amplituda sinyal, τ_n adalah *excess delay*, dan $P(\tau_n)$ adalah daya sinyal terima dalam kanal. *Mean square excess delay* τ^2 yang diperlukan dalam *RMS delay spread* juga dapat dihitung sebagai

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum P(\tau_n) \cdot \tau_n^2}{\sum P(\tau_n)}. \quad (9)$$

E..3 Root Mean Square (RMS) Delay Spread

RMS delay spread dapat dianggap sebagai standar deviasi dari *mean excess delay* yang berbanding lurus dengan daya sinyal terima. *RMS delay spread* σ_τ dapat dihitung dengan

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2}. \quad (10)$$

F. Outage Performances

Outage performances dibutuhkan dalam perancangan sistem komunikasi. *Outage performances* berguna untuk meningkatkan efisiensi daya dengan mengatur daya pancar P_{Tx} . *Outage performances* dapat diketahui dengan menghitung dan mengevaluasi *outage probability* P_{outage} dari kanal. P_{outage} adalah probabilitas ketika kapasitas C turun di bawah *coding rate* R yang ditunjukkan dengan

$$P_{outage} = P_r(R > C). \quad (11)$$

3. Model Sistem

Paper ini melakukan pengujian model kanal yang akan diusulkan dari kondisi parameter tubuh manusia dan dilakukan pengujian kinerjanya menggunakan *channel coding* yang sederhana, yaitu *repetition codes* dan *convolutional codes*. Gambar 6 menunjukkan diagram blok OFDM untuk validasi model kanal yang diusulkan. Tabel 1 merangkum beberapa data yang diperlukan untuk transmisi data informasi medis mengenai kesehatan area tubuh [13].

Tabel 1 Data yang diperlukan untuk informasi medis dan perawatan kesehatan.

Informasi medis	Kecepatan data
<i>Electrocardiogram</i> (ECG)	36 kbps
<i>Electroencephalogram</i> (EEG)	98 kbps
Denyut nadi	2.4 kbps
Tingkat pernapasan	1 kbps
Tekanan darah	1.92 kbps
Denyut jantung	1.92 kbps
Suhu tubuh	2.4 bps
Kapsul endoskopi	10 Mbps

Pemodelan kanal WCE ini menggunakan parameter lingkungan tubuh yang dianggap dapat merepresentasikan kondisi tubuh manusia sebagai batas cakupan *paper* ini. Simulasi dan perhitungan pada model kanal WCE ini dilakukan dengan meninjau satu titik pengirim *transmitter* dan 1000 titik penerima *receiver* untuk menghasilkan *power delay profile* (PDP) berdasarkan kondisi tubuh. *Paper* ini menguji model kanal WCE dengan mempertimbangkan jarak antara *transmitter* T_x dan *receiver* R_x sebesar 0.5 meter. Jarak ini mengikuti jangkauan sistem kapsul dengan alat sensor yang dipasang di atas tubuh pasien. *Path loss* yang bervariasi pada setiap jarak memengaruhi daya di sisi *receiver* untuk memperoleh *representative PDP*.

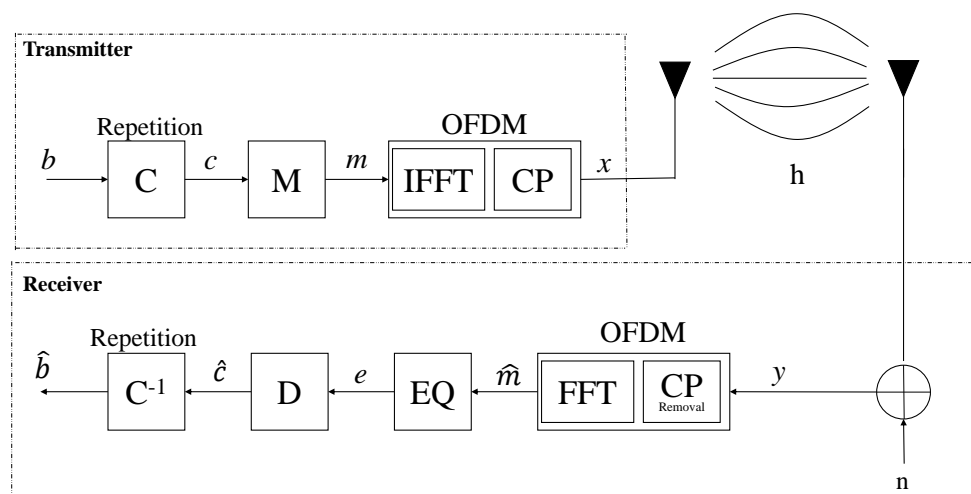
Evaluasi pada model kanal WCE dimulai dengan menentukan parameter-parameter kondisi tubuh, yaitu frekuensi dan *bandwidth* yang digunakan di bidang kesehatan, tekanan dalam tubuh, suhu tubuh, serta kelembapan. Kemudian, parameter-parameter tersebut dimasukkan ke NYUSIM *Channel Simulator*, yaitu sebuah *software* untuk simulasi pemodelan kanal WCE. Model kanal yang diperoleh melalui NYUSIM *Channel Simulator* sudah divalidasi dan hasilnya cukup mendekati model kanal WCE.

NYUSIM *Channel Simulator* menghasilkan keluaran berupa *instantaneous PDP* yang berisi daya dan *delay* untuk setiap *path* mewakili kanal. *Instantaneous PDP* adalah nilai PDP sesaat yang bervariasi terhadap waktu. Kemudian, *delay* dari setiap PDP akan dibulatkan dengan rentang pembulatan menurut Teorema *Nyquist* dengan mempertimbangkan *bandwidth* yang digunakan. Nilai *representative PDP* akan diberikan *threshold* sebesar -90 dB [14] dan nilai di bawah *threshold* dianggap sebagai *noise*. Langkah terakhir dalam proses pengolahan PDP adalah normalisasi untuk setiap *representative PDP* yang diperoleh setelah proses *thresholding*.

A. NYUSIM Channel Simulator

New York University Simulator (NYUSIM) *Channel Simulator* adalah perangkat lunak (*software*) berbasis komputer untuk memodelkan kanal WCE dari New York University. *Paper* ini menggunakan NYUSIM *Channel Simulator* untuk memperoleh *instantaneous PDP* sebagai representasi kanal komunikasi WCE dengan mengatur parameter-parameter lingkungannya. Parameter input pada NYUSIM *Channel Simulator* yang mengasumsikan kondisi lingkungan tubuh manusia antara bernilai sebagai berikut:

- Frekuensi = 3.4 GHz,
- *Bandwidth* = 500 MHz,
- Skenario = *Urban Micro (UMi)*,
- Lingkungan propagasi (*environment*) = *Non-Line-of-Sight (NLOS)*,
- Jarak T_x dengan R_x = 0.5 meter (*transmitter* berada di dalam tubuh dan *receiver* dililitkan di luar tubuh manusia),
- Daya T_x = 19 dBm (berdasarkan total konsumsi daya dari komponen WCE),



Gambar 6 Struktur blok *transmitter* dan *receiver* CP-OFDM untuk validasi model kanal WCE.

- Jumlah titik lokasi $R_x = 1.000$,
- Tekanan udara = 160 mbar (berdasarkan data tekanan dalam tubuh manusia secara normal),
- Kelembapan = 50 % (berdasarkan data kelembapan normal tubuh manusia),
- Suhu = 36° C (berdasarkan data suhu normal tubuh manusia),
- Polarisasi = *Circular Polarization* (Co-Pol),
- Redaman dedaunan (*foliage loss*) = No,
- Jarak penyebaran dedaunan = 0 meter,
- Atenuasi dedaunan (*foliage attenuation*) = 0 dB/m.

B. Perhitungan Representative PDP

Instantaneous PDP merupakan nilai *path* sesaat yang bervariasi terhadap waktu. *Representative* PDP dibutuhkan untuk menjadi model kanal WCE karena mewakili *path* dari semua kanal WCE. *Paper* ini mengusulkan cara mendapatkan model kanal dengan langkah-langkah seperti yang dilakukan untuk mendapatkan model kanal 5G [15] dan 5G dengan memperhatikan efek temperatur [16]. Langkah-langkah tersebut secara sederhana dapat dituliskan sebagai berikut:

1. Tentukan parameter-parameter kanal masukan di NYUSIM *Channel Simulator* dan parameter *bandwidth* simulasi B_{sim} menurut persamaan $B_{sim} = 2B$ dengan B adalah *bandwidth* transmisi.
2. Bangkitkan sejumlah *instantaneous* PDP. *Paper* ini membangkitkan 1.000 *instantaneous* PDP demi akurasi nilai PDP yang tinggi.
3. Bulatkan *delay* setiap PDP menurut Teorema *Nyquist*, yaitu rentang pembulatan ΔT memenuhi persamaan $\Delta T \leq 1/B$ untuk semua *path*.
4. Tambahkan seluruh hasil *path* pada setiap slot waktu t .
5. Lakukan *scaling method* dengan memperhatikan ukuran FFT yang sebenarnya FFT_{real} . Perhitungan *scaling method* dilakukan untuk mengetahui total *path mapped* $\sum PDP_{mapped}$ yang sesuai untuk mewakili seluruh *path* asli dari kanal apabila ukuran FFT dalam simulasi FFT_{mapped} lebih kecil dari FFT_{real} . *Paper* ini menggunakan *scaling method* dengan $FFT_{mapped} = 128$, sehingga setiap *path* yang berada pada slot waktu t akan ditempatkan di slot waktu baru τ menurut perhitungan *scaling method* sebagai

$$\sum PDP_{mapped} = \frac{FFT_{mapped}}{FFT_{real}} \cdot \sum PDP_{real} \quad (12)$$

6. Tentukan nilai persentil ke-90 dari CDF setiap *path* yang dijadikan sebagai *representative* PDP.
7. Gunakan *threshold* -140 dBm lalu mengambil semua *path* di atas nilai ini sebagai *path* pada *representative* PDP.
8. Lakukan normalisasi setiap *representative* PDP.

C. Perhitungan Kapasitas Kanal

Nilai *representative* PDP digunakan dalam perhitungan kapasitas kanal WCE. Kapasitas kanal C adalah nilai maksimum *mutual information* dari informasi yang dikirim dan diterima, dengan probabilitas kesalahan (*error probability*) mendekati nol ketika *coding rate* R di bawah C . Kapasitas kanal dapat dihitung berdasarkan Teorema Kapasitas *Shannon* yang dinyatakan sebagai

$$C \approx B \cdot \log_2(1 + \gamma), \quad (13)$$

dengan C adalah kapasitas kanal, B adalah *bandwidth* kanal dalam satuan *Hertz*, dan γ adalah SNR dalam numerik. Persamaan (13) merupakan rumus kapasitas kanal untuk kanal *single path*. Pada kanal *multipath fading* persamaannya dapat dinyatakan sebagai

$$C \approx \frac{B}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \log_2(1 + (|\psi_n|^2 \cdot \gamma)), \quad (14)$$

dengan N adalah panjang *block* yang ditransmisikan. Simbol ψ merupakan nilai *Eigen* dari kanal yang diperoleh dari hasil *representative* PDP dan dinyatakan sebagai

$$\psi = \text{diag}[\mathbf{F} \cdot \mathbf{H}_c \cdot \mathbf{F}_H], \quad (15)$$

dengan \mathbf{F} adalah matriks hasil FFT, \mathbf{H}_c adalah matriks *path* kanal pada sisi *receiver* setelah CP dihapus, dan \mathbf{F}_H adalah matriks IFFT.

SNR γ dinyatakan sebagai

$$\gamma = \frac{E_b}{N_0} \cdot M \cdot R \cdot \frac{N}{N+Q}, \quad (16)$$

dengan E_b/N_0 adalah *energy per bit-to-noise power spectral density ratio*, M adalah indeks modulasi, R adalah *coding rate* pada kanal, dan Q adalah panjang CP. Untuk menghitung panjang CP Q dapat dinyatakan sebagai

$$Q = \frac{T_{CP}}{T_{OFDM}} \cdot N_{FFT}, \quad (17)$$

dengan T_{CP} adalah durasi CP, T_{OFDM} adalah durasi simbol OFDM, dan N_{FFT} adalah ukuran FFT yang digunakan.

D. Perhitungan Outage Performances

Outage performances diperoleh dari menghitung dan mengevaluasi *outage probability*. *Outage probability* P_{outage} adalah probabilitas ketika kapasitas kanal C lebih kecil dari *coding rate* R yang dinyatakan sebagai

$$P_{outage} = P_r(R > C). \quad (18)$$

Outage probability membuktikan bahwa transmisi informasi dengan *error probability* P_{error} mendekati nol ($P_{error} \rightarrow 0$) jika $R \leq C$.

E. Validasi Kinerja pada Model Kanal WCE

E.1 Pengujian Bit Error Rate

Perhitunagn dan analisis *bit error rate* (BER) dalam *Paper* berdasarkan sistem CP-OFDM dapat dihitung sebagai

$$P_b = \frac{Bit_{error}}{Bit_{transmitted}}, \quad (19)$$

dengan P_b adalah peluang BER, Bit_{error} adalah jumlah bit yang *error* dan $Bit_{transmitted}$ adalah jumlah bit yang ditransmisikan. Kinerja BER pada kanal *multipath fading* akan lebih baik dari kanal *single path* akibat adanya efek *diversity*.

E.2 Pengujian Frame Error Rate

Perhitunagn dan analisis *frame error rate* (FER) dalam *Paper* berdasarkan sistem CP-OFDM dapat dihitung sebagai

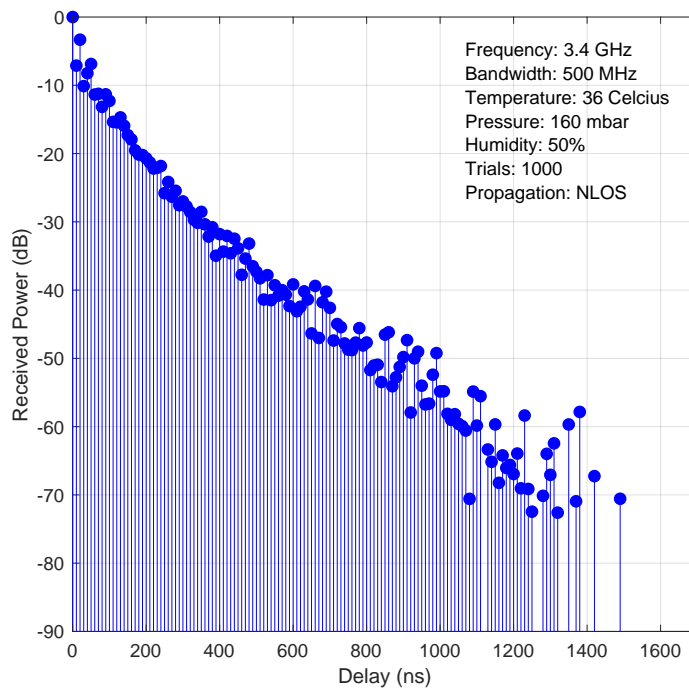
$$P_f = \frac{Frame_{error}}{Frame_{transmitted}}, \quad (20)$$

dengan P_f adalah peluang FER, $Frame_{error}$ adalah jumlah *frame* yang *error* dan $Frame_{transmitted}$ adalah jumlah *frame* yang ditransmisikan. *Frame* dianggap *error* ketika ada satu bit saja dalam *frame* tersebut yang *error*.

4. Evaluasi Kinerja

A. Usulan Model Kanal

Model kanal WCE diperoleh dari *representative* PDP yang dihitung dari ribuan *instantaneous* PDP yang dibangkitkan menggunakan NYUSIM *Channel Simulator* berdasarkan parameter-parameter lingkungan di dalam tubuh manusia, antara lain tekanan, kelembapan, dan suhu. Rata-rata tubuh manusia memiliki karakteristik tekanan dalam tubuh sebesar 160 *mbar*, kelembapan dalam tubuh idelnya sebesar 50 %, dan suhu normal tubuh manusia sebesar 36 °C. *Instantaneous* PDP yang kanal WCE ditampilkan pada Gambar 7. Simulasi dari *paper* ini memperoleh karakteristik, yaitu hasil *instantaneous* PDP sebanyak 1.971 *path* dengan jumlah *path* yang memiliki daya sesuai ketentuan *threshold* sebanyak 134 *path* dan jumlah *path* kosong atau dengan nilai $-\infty$ sebanyak 1.837 *path*. *Paper* ini memodelkan nilai *representative* PDP menggunakan teknik *scaling method* agar jumlah *path* lebih sedikit atau sama dengan panjang CP. Gambar 8 menampilkan *representative* PDP yang telah dinormalisasi menjadi model kanal yang diusulkan untuk komunikasi WCE.



Gambar 7 Instantaneous PDP untuk pemodelan kanal WCE.

B. Analisis Outage Performances pada Model Kanal WCE

Paper ini mengevaluasi kinerja model kanal WCE dalam *outage performances*. *Paper* ini membandingkan teori *outage performances* dengan kinerja *outage performances* berdasarkan simulasi yang diperoleh dari FER. Kurva teori *outage performances* diperoleh berdasarkan nilai probabilitas kapasitas kanal ketika $R = C$. *Outage* terjadi ketika $R > C$. *Paper* ini melakukan perhitungan kapasitas dengan 150.000 percobaan untuk mengamati kapasitas masing-masing *representative* PDP dalam *coding rate* $R = 1$, $R = 1/3$, dan $R = 1/8$ menggunakan modulasi BPSK. Gambar 9 menunjukkan *outage probability* sebesar 10^{-4} yang dicapai pada E_b/N_0 9,571 dB pada $R = 1$, E_b/N_0 8,051 dB pada $R = 1/3$, dan E_b/N_0 6,477 dB pada $R = 1/8$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja model kanal WCE memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan kanal *single path*. Hasil *outage performances* dan nilai-nilai E_b/N_0 tersebut diharapkan dapat menjadi referensi nilai daya yang dibutuhkan untuk pengembangan dan implementasi perangkat WCE.

C. Validasi Parameter Kinerja

Paper ini menyajikan kinerja BER dan FER untuk memverifikasi kinerja teori *outage performances* dari model kanal WCE. Kinerja tersebut dianalisis menggunakan sistem CP-OFDM dengan modulasi BPSK.

C..1 Kinerja BER

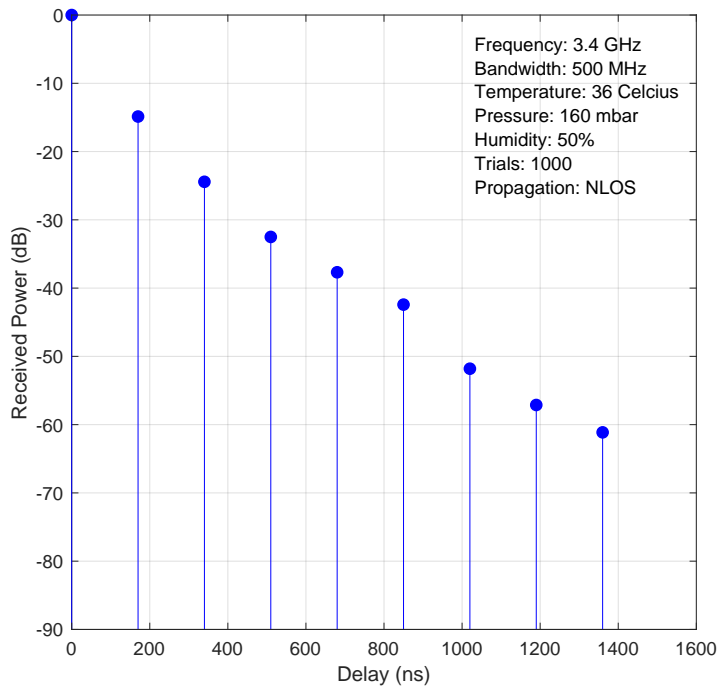
Paper ini mengevaluasi dan menampilkan kinerja BER dari kanal WCE yang diharapkan dapat menjadi referensi dalam mengembangkan sistem WCE di Indonesia. *Paper* juga membandingkan hasil kinerja BER dengan teori BER pada kanal *single path* dalam E_b/N_0 .

Kinerja BER dari sistem yang diusulkan menggunakan CP-OFDM, modulasi BPSK, *channel coding repetition codes* dengan *coding rate* $R = 1/3$, dan *convolutional codes* $R = 1/8$ ditunjukkan pada Gambar 10.

Pada model kanal WCE, BER 10^{-4} dicapai saat E_b/N_0 21,276 dB untuk *repetition codes* $R = 1/8$, E_b/N_0 17,542 dB untuk *convolutional codes* $R = 1/3$, dan E_b/N_0 34,386 dB untuk tanpa *channel coding*. Gambar 10 menunjukkan kinerja model kanal WCE menggunakan *convolutional codes* memiliki kinerja yang lebih baik daripada model kanal WCE yang menggunakan *repetition codes*.

C..2 Kinerja FER

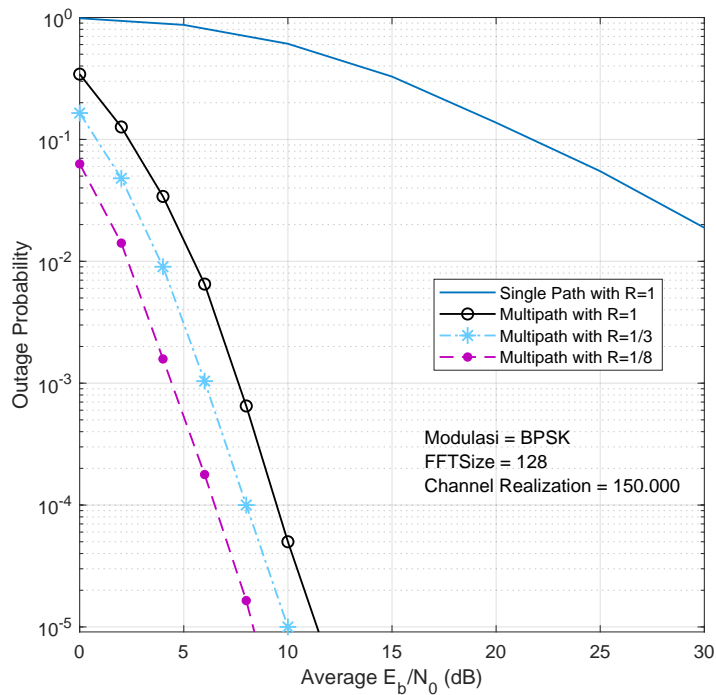
Paper ini juga mengevaluasi dan menampilkan kinerja FER dengan jumlah *frame* sebanyak 150.000, panjang CP $Q = 9$, dan ukuran FFT sebesar 128. Kinerja FER ditunjukkan pada Gambar 11 menggunakan CP-OFDM,



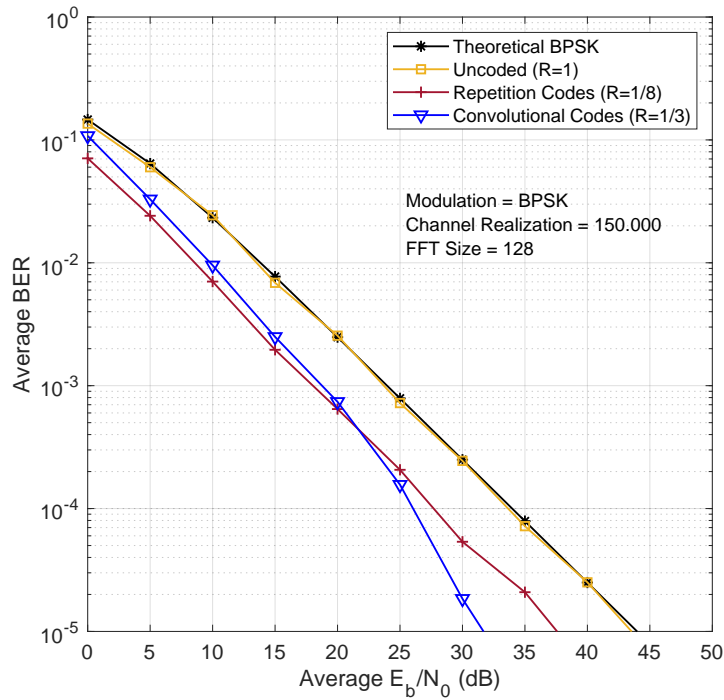
Gambar 8 Usulan model kanal WCE.

modulasi BPSK, *channel coding repetition codes* dengan *coding rate* $R = 1/3$, dan *convolutional codes* $R = 1/8$.

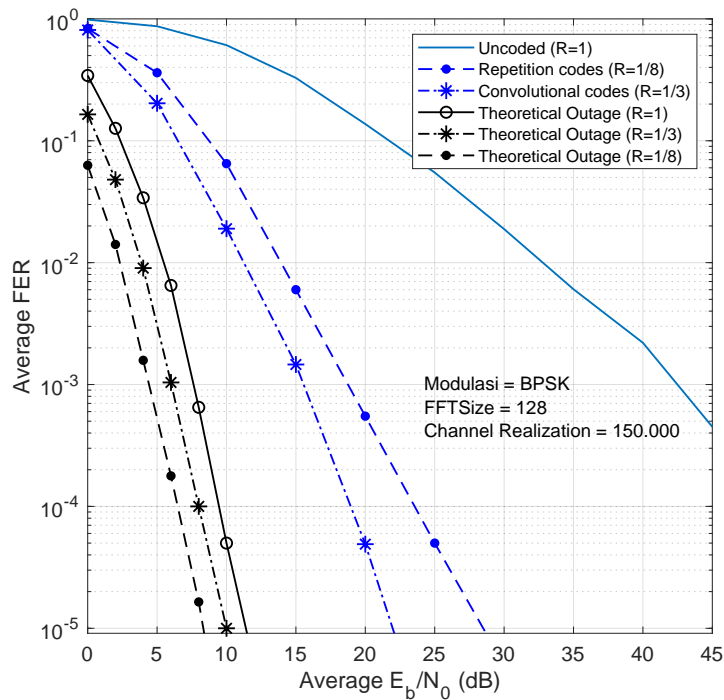
Pada model kanal WCE, FER 10^{-4} dicapai saat E_b/N_0 23,594 dB untuk *repetition codes* $R = 1/8$ dan E_b/N_0 18,915 dB untuk *convolutional codes* $R = 1/3$. Gambar 11 menunjukkan bahwa kinerja FER pada kanal WCE



Gambar 9 Outage performances dari kanal WCE dengan *singlepath* $R = 1$, *multipath* $R = 1$, *multipath* $R = 1/3$, dan *multipath* $R = 1/8$.



Gambar 10 Kinerja BER praktis untuk WCE dengan repetition dan convolutional codes menggunakan kanal model WCE yang diusulkan.



Gambar 11 Kinerja FER teori untuk WCE yang menggunakan model kanal yang diusulkan dan kinerja FER praktis menggunakan repetition dan convolutional codes.

menggunakan *convolutional codes* lebih baik daripada *repetition codes*. Hal ini menunjukkan bahwa untuk *convolutional codes* memiliki kemampuan koreksi lebih baik/kuat pada setiap *frame* daripada *repetition codes*, meskipun *repetition codes* menggunakan *code rate* yang lebih rendah.

5. Kesimpulan

Paper ini telah mengusulkan model kanal WCE dengan mengasumsikan parameter lingkungan sama dengan parameter di dalam tubuh manusia serta validasi modelnya dengan menggunakan *channel coding* praktis. Simulasi komputer yang digunakan adalah NYUSIM *Channel Simulator* untuk menghasilkan *representative* PDP yang dapat merepresentasikan model kanal WCE berdasarkan parameter lingkungan di dalam tubuh yang dianggap mewakili kondisi lingkungan tubuh manusia. *Channel coding* yang dipakai dalam *Paper* ini adalah *repetition codes*, yaitu *channel coding* yang sangat sederhana. *Channel model* WCE yang diusulkan dalam *Paper* ini memiliki 9 *path* dengan interval delay 170 ns. Jumlah *path* yang memiliki daya sesuai dengan ketentuan *threshold* sebanyak 134 *path* dan jumlah *path* kosong atau bernilai $-\infty$ sebanyak 1.837 *path*. Usulan *channel model* WCE telah divalidasi dengan mengevaluasi kinerja kurva *outage performance* dan FER. Hasil simulasi pada *paper* ini menunjukkan bahwa *channel coding convolutional codes*, lebih kuat daripada *repetition codes*, lebih baik digunakan untuk memvalidasi *outage performances* dari suatu model kanal, termasuk WCE.

Pustaka

- [1] A. N. Detikcom. (2017) Deteksi dini kanker usus besar dengan endoskopi. [Online]. Available: <https://news.detik.com/adv-nhl-detikcom/d-3536940/deteksi-dini-kanker-usus-besar-dengan-endoskopi>
- [2] R. Negra, I. Jemili, and A. Belghith, "Wireless body area networks: Applications and technologies," *Procedia Computer Science*, vol. 83, pp. 1274–1281, 2016.
- [3] S. Støa, R. Chavez-Santiago, and I. Balasingham, "An ultra wideband communication channel model for capsule endoscopy," in *2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010)*, Nov 2010, pp. 1–5.
- [4] Q. Wang, K. Wolf, and D. Plettemeier, "An UWB capsule endoscope antenna design for biomedical communications," in *2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010)*, Nov 2010, pp. 1–6.
- [5] N. Dey, A. S. Ashour, F. Shi, and R. S. Sherratt, "Wireless capsule gastrointestinal endoscopy: Direction-of-arrival estimation based localization survey," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 10, pp. 2–11, 2017.
- [6] E. Tuba, S. Tomic, M. Beko, D. Zivkovic, and M. Tuba, "Bleeding detection in wireless capsule endoscopy images using texture and color features," in *2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 2018, pp. 1–4.
- [7] S. Zhang, Y. H. Liu, Y. P. Qin, J. M. Kuang, J. N. Yang, J. W. Li, J. J. Wang, T. Zhang, and X. M. Zou, "Experimental verification of human body communication path gain channel modeling for muscular-tissue characteristics," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 122 769–122 783, 2019.
- [8] G. Vermeeren, E. Tanghe, A. Thielens, L. Martens, and W. Joseph, "In-to-out body path loss for wireless radio frequency capsule endoscopy in a human body," in *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Aug 2016, pp. 3048–3051.
- [9] I. F. E. Sobiroh, K. Anwar, and H. Mukhtar, "Rateless raptor codes for reliable wireless capsule endoscopy (WCE)," in *2020 27th International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2020, pp. 1–5.
- [10] H. Harada and R. Prasad, *Simulation and Software Radio for Mobile Communications*. USA: Artech House, Inc., 2002.
- [11] T. K. Moon, *Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms*. USA: Wiley-Interscience, 2005.
- [12] K. Anwar and T. Matsumoto, "Accumulator-assisted distributed turbo codes for relay systems exploiting source-relay correlation," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 7, pp. 1114–1117, 2012.
- [13] J. Wiley and L. Sons, *Body Area Communications: Channel Modeling, Communication Systems, and EMC*, 2012.
- [14] S. Perez-Simbor, M. Barbi, M. Ramzan, X. Fang, C. Garcia-Pardo, N. Cardona, Q. Wang, N. Neumann, and D. Plettemeier, "Experimental path loss models comparison and localization of wireless endoscopic capsule in the ultra-wideband frequency band," in *13th EAI International Conference on Body Area Networks*, C. Sugimoto, H. Farhadi, and M. Hämäläinen, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 443–453.

- [15] E. M. Alfaroby, N. M. Adriansyah, and K. Anwar, "Study on channel model for Indonesia 5G networks," in *2018 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, 2018, pp. 125–130.
- [16] M. N. Rahman, K. Anwar, and L. O. Nur, "Indonesia 5G channel model considering temperature effects at 28 GHz," in *2019 Symposium on Future Telecommunication Technologies (SOFTT)*, vol. 1, 2019, pp. 1–6.

