

Mengungkap Tren dan Kemajuan Terbaru dalam Modulasi Digital dan Transmisi pada Sistem Telekomunikasi melalui Tinjauan Komprehensif dan Agenda Penelitian

Irfan Mujahidin

Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Semarang
Jl. Prof. Sudarto, Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275, (024) 7473417
email: irfan.mujahidin@polines.ac.id

Abstrak

Kemajuan teknologi modulasi digital telah menciptakan kebutuhan akan sistem telekomunikasi yang efisien dengan kinerja tinggi yang mampu menangani pengiriman arus informasi yang begitu besar dengan tingkat kesalahan minimal. Berbagai teknologi modulasi telah menjadi pilihan populer untuk diaplikasikan dalam sistem telekomunikasi seperti penggunaan modulasi QAM, PSK, FSK dalam beberapa transmisi kabel dan nirkabel. Tinjauan literatur ini bertujuan untuk mengungkap tren dan kemajuan terbaru tentang modulasi digital pada sistem telekomunikasi dengan melakukan tinjauan yang komprehensif dari beberapa penelitian modulasi digital yang telah dilakukan serta mengidentifikasi inovasi dan strategi menghadapi tantangan sebagai bahan untuk agenda penelitian yang baru. Tinjauan ini akan bermanfaat untuk memberikan pengertian yang dalam mengenai perkembangan modulasi digital sehingga diharapkan mampu mendorong pengembangan modulasi digital pada sistem telekomunikasi yang lebih efisien.

Kata kunci: Sistem Telekomunikasi, Modulasi Digital, Media Transmisi

Abstract

The advancement of digital modulation technology has created the need for an efficient telecommunication system with high performance capable of handling the transmission of such a large flow of information with minimal error rate. Various modulation technologies have become popular choices for application in telecommunication systems such as the use of QAM, PSK, and FSK modulation in several wired and wireless transmissions. This literature review aims to uncover the latest trends and advances in digital modulation in telecommunication systems by conducting a comprehensive review of some of the digital modulation research that has been done as well as identifying innovations and strategies to face challenges as material for a new research agenda. This review will be useful to provide a deeper understanding of the development of digital modulation to encourage the development of digital modulation in more efficient telecommunication systems.

Keywords: Telecommunication System, Digital Modulation, Transmission Media

1. PENDAHULUAN

Di era terus berkembangnya teknologi telekomunikasi, modulasi digital menjadi inti dari berbagai inovasi yang mendukung konektivitas global. Penelitian-penelitian terkini dalam modulasi digital sistem telekomunikasi menyoroti pemahaman mendalam terhadap format-format modulasi seperti QAM, PSK, dan OFDM, serta penerapannya dalam berbagai saluran komunikasi termasuk optik, saluran listrik hingga saluran satelit.

Seiring perkembangan modulasi digital, beragam inovasi penelitian yang muncul telah menghadirkan pemahaman penting akan efisiensi sistem untuk berbagai pengaplikasian. Modulasi digital menjadi berperan penting dalam perancangan sistem telekomunikasi yang semakin kompleks.

Kemajuan-kemajuan dalam pengembangan modulasi digital pada sistem telekomunikasi juga disertai dengan munculnya berbagai tantangan. Sistem yang handal dan memiliki skalabilitas yang baik dalam menghadapi lingkungan yang dinamis

dan terus berubah-ubah menjadi tantangan yang mendapatkan perhatian khusus. Dalam konteks transmisi data melalui saluran optik atau satelit, daya tahan sistem perlu ditingkatkan untuk menghadapi gangguan atmosfer dan kehilangan hilang dalam pengiriman, yang dapat mempengaruhi integritas dan kualitas sinyal.

Modulasi tingkat tinggi atau skema coding yang canggih juga memiliki tantangan tersendiri dalam proses implementasi yang kompleks. Penyederhanaan proses implementasi yang mampu mempertahankan kinerja yang tinggi menjadi perhatian penting dalam mengembangkan sistem untuk kebutuhan jaringan yang semakin kompleks.

Pemahaman yang mendalam akan karakteristik dan parameter yang mempengaruhi kinerja modulasi digital perlu diperluas sebagai upaya meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Pengelolaan daya yang efisien serta perangkat yang mumpuni menjadi kunci dalam menjawab berbagai tantangan.

Melalui tinjauan dari beberapa penelitian dengan pendekatan selective literature review, akan disajikan gambaran komprehensif tentang tren dan kemajuan terbaru dalam modulasi digital pada sistem telekomunikasi. Tinjauan ini juga akan memberi dasar bagi agenda penelitian mendatang, memberikan arah untuk pengembangan efisiensi, keandalan, dan skalabilitas sistem telekomunikasi. Kajian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mendalam akan modulasi digital untuk menjawab tantangan-tantangan dalam pengembangan sistem telekomunikasi yang lebih canggih dan efektif.

2. DASAR TEORI

2.1. Sistem Telekomunikasi

Tujuan telekomunikasi adalah untuk menghasilkan komunikasi suara, video, dan data berkualitas tinggi dari dua lokasi yang berbeda.

Transmisi koneksi data dan suara dapat disediakan dengan sambungan radio, misalnya, ke daerah terpencil dengan akses

yang tidak memungkinkan dibangun infrastruktur kabel tembaga atau serat optik. Selain itu, radio link adalah solusi yang layak di daerah yang lebih padat dengan keterbatasan kapasitas jaringan kabel.

Beragam teknologi digunakan oleh sistem telekomunikasi untuk mengirimkan sinyal. Komunikasi yang efektif dapat dicapai dalam jarak beberapa kilometer hingga puluhan kilometer dengan komunikasi radio, yang menggunakan gelombang mikro dan antena terkonsentrasi. Di sisi lain, hambatan seperti interferensi dan redaman yang disebabkan oleh hujan dapat menghambat kinerja mereka. Dalam komunikasi radio metropolitan, frekuensi antara 15 dan 58 GHz sering digunakan. Untuk komunikasi jarak jauh, khususnya telekomunikasi lintas benua, sistem satelit - pasif dan aktif - sangat penting.

Kabel fisik adalah tulang punggung infrastruktur sistem telekomunikasi. Karena kekuatan dan kemudahan pemasangannya, tembaga adalah pilihan umum untuk serat optik dan jalur tembaga, yang digunakan secara luas. Meskipun jalur tembaga telah digunakan untuk waktu yang lama, mempertahankan kekuatan sinyal dalam jarak jauh membutuhkan repeater, yang menyebabkan gangguan pada sistem analog. Kabel *twisted pair* memiliki masalah interferensi yang menyebabkan efisiensinya menurun dengan bertambahnya jarak.

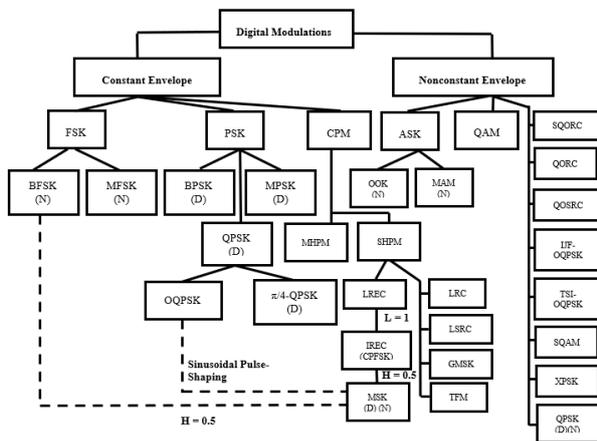
Kabel koaksial memberikan opsi yang lebih canggih dengan pelindung interferensi yang lebih baik yang dapat digunakan untuk mentransmisikan sinyal radio dan sistem inti. Redaman kabel koaksial dipengaruhi oleh variabel lain seperti diameter, frekuensi sinyal, suhu, dan bahan isolasi. Serat optik yang menggunakan laser atau dioda pemancar cahaya untuk modulasi on-off, menawarkan teknik transmisi data jarak jauh yang efektif. Serat optik bekerja lebih baik dalam jaringan modern daripada kabel logam karena kapasitasnya yang lebih tinggi dan redamannya yang lebih kecil. Berbagai jenis serat, termasuk mode tunggal dan multimode, tersedia untuk berbagai aplikasi. Perilaku

jenis serat ini bergantung pada faktor-faktor seperti struktur kelongsong dan ukuran inti.

2.2. Modulasi Digital

Teknik modulasi digital sangat penting untuk banyak sistem komunikasi digital, baik itu sistem telepon, sistem komunikasi seluler, atau sistem komunikasi satelit.

Diagram pohon pada Gambar 1 menunjukkan bagaimana modulasi ini berhubungan satu sama lain. Ada beberapa skema "induk" yang darinya skema tertentu dapat diturunkan. Skema yang mendukung demodulasi nonkoheren diberi label dengan huruf N, dan skema yang mendukung pengkodean diferensial ditandai dengan huruf D. Setiap skema dapat didemodulasi secara logis.



Gambar 1 Diagram pohon modulasi digital

Amplop konstan dan amplop nonkonstan adalah dua kategori utama yang menjadi dasar pembagian sistem modulasi yang berbeda. Sementara ASK, QAM, dan modulasi *nonconstant envelope* lainnya termasuk dalam kelas *nonconstant envelope*, kelas *constant envelope* terdiri dari FSK, PSK, dan CPM.

Meskipun skema kompleks seperti MSK, GMSK, CPM, MHPM, dan QAM merupakan modifikasi dan kombinasi dari dasar-dasarnya, modulasi dasar seperti ASK, PSK, dan FSK sangat penting. Sistem yang menggunakan penguat daya nonlinier, seperti TWTA pada komunikasi satelit, cocok untuk modulasi amplop konstan. Sistem komunikasi satelit telah menggunakan teknik

PSK seperti BPSK, QPSK, OQPSK, dan MSK.

Karena $\pi/4$ -QPSK dapat mencegah perubahan fase yang tiba-tiba, maka teknik ini mendapat perhatian khusus dan telah digunakan pada sistem seluler digital seperti sistem seluler digital Amerika Serikat (USDC). Dibandingkan dengan skema PSK, skema CPM-seperti LREC, LRC, LSRC, GMSK, dan TFM-memiliki amplop yang konstan dan transisi fase yang kontinu, sehingga mengurangi energi sisi lobus.[28]

Selain QAM dengan konstelasi sinyal yang besar, yang mencapai efisiensi bandwidth yang besar, penguat daya nonlinier biasanya tidak cocok untuk skema amplop nonkonstan seperti ASK dan QAM. Beberapa teknik *nonconstant envelope* memiliki volatilitas amplitudo yang rendah dan efisiensi bandwidth yang kuat, sehingga ideal untuk aplikasi satelit.

Metode modulasi yang berbeda, termasuk MFSK, QAM, QPSK/OQPSK, dan BPSK, dibandingkan dalam hal daya dan efisiensi bandwidth untuk menunjukkan pertukaran di antara keduanya. Selain itu, sistem seperti standar IEEE 802.11a menggunakan modulasi multicarrier (MCM), khususnya *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), yang telah menarik perhatian. OFDM mengurangi interferensi antar simbol dalam saluran *multipath fading* dengan mengubah data serial menjadi simbol paralel yang dikirim pada subcarrier ortogonal. QAM dan PSK adalah modulasi yang umum digunakan untuk OFDM, dengan wavelet dan M-array ASK diperhitungkan. Ada kemungkinan bahwa di masa depan, OFDM akan menggunakan lebih banyak modulasi.

3. METODE DAN DESAIN PENELITIAN

Penelitian ini dirancang dengan menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR). *Systematic Literature Review* (SLR) adalah proses sistematis yang mencakup pengenalan, penilaian, dan penafsiran semua bukti penelitian yang ada, dengan tujuan memberikan solusi bagi pertanyaan penelitian yang spesifik.

Keunggulan dari metode ini adalah tidak perlu merumuskan kerangka teoritis yang spesifik karena hanya diperlukan analisa terhadap jurnal penelitian yang telah dibuat peneliti lain sebelumnya.

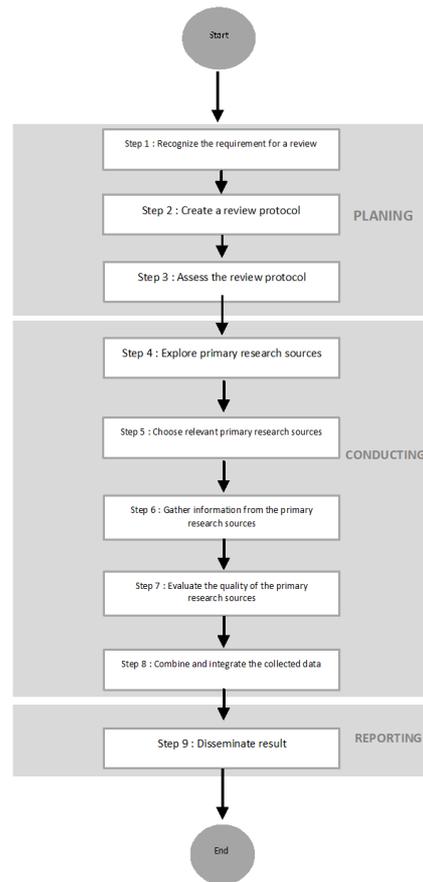
Seperti yang ditunjukkan Gambar 1, SLR dilakukan dalam tiga tahap yaitu *planning*, *conduction*, dan *reporting*. Pada tahap *planning*, pada dasarnya adalah menyusun protokol review yang berisi langkah-langkah untuk mendefinisikan kebutuhan dari review. Kemudian pada tahapan kedua adalah *conduction*, dimana pada tahapan ini dilakukan proses pencarian, seleksi, dan assesmen terhadap jurnal yang digunakan hingga dilakukan proses ekstraksi sintesis data. Setelah tahap *conduction* selesai dilakukan tahapan *reporting* yang bertujuan untuk menuliskan dalam bentuk laporan.

3.1. Pertanyaan Penelitian

Pertanyaan Penelitian ditentukan untuk menjaga agar SLR tetap terfokus pada tujuan yang telah ditetapkan. Untuk menyusun *Research Questions* digunakan metode Populasi, Intervensi, Perbandingan, Hasil, dan Konteks (PICOC). Pada tabel satu memperlihatkan kerangka metode PICOC dan pertanyaan penelitian (RQ).

Tabel 1. PICOC

Populasi (P)	Modulasi digital sistem telekomunikasi
Intervensi (I)	Model, metode, teknik
Perbandingan (C)	n/a
Hasil (O)	Memahami tren dan kemajuan terbaru dalam modulasi digital sistem telekomunikasi
Konteks (C)	Modulasi digital



Gambar 2 Pencarian dan Pemilihan Studi Utama

Tabel dua memperlihatkan pertanyaan penelitian (RQ) dan motivasi yang tengah diselidiki pada tinjauan literatur.

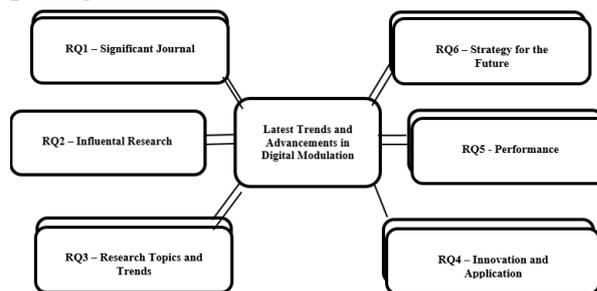
Tabel 2. Pertanyaan penelitian

ID	Research Question	Motivasi
RQ1	Apa jurnal yang tersignifikan tentang tren dan kemajuan terbaru dalam modulasi digital sistem telekomunikasi ?	Mengidentifikasi jurnal yang paling signifikan yang membahas tren dan kemajuan terbaru dalam modulasi digital sistem telekomunikasi
RQ2	Siapa peneliti yang paling berpengaruh dan aktif dalam tren dan kemajuan	Mengidentifikasi peneliti yang paling aktif dan berpengaruh dalam tren dan kemajuan terbaru

ID	Research Question	Motivasi
	terbaru dalam modulasi digital sistem telekomunikasi ?	dalam modulasi digital sistem telekomunikasi
RQ3	Topik penelitian seperti apa yang dipilih oleh para peneliti dalam tren dan kemajuan terbaru dalam bidang modulasi digital sistem telekomunikasi ?	Mengidentifikasi topik penelitian yang dipilih oleh para peneliti dalam tren dan kemajuan terbaru dalam bidang modulasi digital sistem telekomunikasi
RQ4	Apa saja inovasi terbaru yang telah muncul dalam modulasi digital dan bagaimana penerapannya dalam meningkatkan efisiensi sistem telekomunikasi ?	Mengidentifikasi inovasi terbaru dalam modulasi digital dan penerapannya dalam meningkatkan efisiensi sistem telekomunikasi
RQ5	Bagaimana tren dan perkembangan terbaru teknologi modulasi digital dalam mempengaruhi kinerja sistem telekomunikasi ?	Mengidentifikasi tren dan perkembangan terbaru dalam teknologi modulasi digital dalam mempengaruhi kinerja sistem telekomunikasi
RQ6	Apa strategi yang perlu di eksplorasi	Mengidentifikasi strategi dalam tren dan

ID	Research Question	Motivasi
	berdasarkan tren dan perkembangan terbaru dalam modulasi digital untuk memperbaiki sistem telekomunikasi di masa depan ?	perkembangan terbaru dalam modulasi digital untuk memperbaiki sistem telekomunikasi di masa depan

Tinjauan literatur sistematis ini menitikberatkan pada *research question* RQ4 hingga RQ6. Pertanyaan-pertanyaan ini digunakan untuk mendukung penelitian agar lebih terkonsentrasi pada tren dan perkembangan terbaru pada modulasi digital sistem telekomunikasi. Sementara pada *research question* RQ1 hingga RQ3 memberikan abstraksi dari bidang penelitian yang berkaitan dengan topik yang dibahas pada gambar 3.



Gambar 3 Peta pikiran dasar tentang tren dan kemajuan terkini dalam modulasi digital sistem telekomunikasi

3.2. Strategi Pencarian

Langkah selanjutnya adalah menentukan bagaimana strategi pencarian pustaka yang akan direview. Prosedur ini mencakup pencarian sumber pustaka, penggunaan kata kunci pencarian, tahun terbit, dan jenis pustaka. Tahapan ini memverifikasi bahwa pencarian yang komprehensif dapat dilakukan secara efektif. Basis data yang digunakan dalam pencarian pustaka adalah *Semantic Scholar* (<https://www.semanticscholar.org/>).

Pencarian kata kunci disusun berdasarkan prosedur mengidentifikasi kata kunci pencarian berdasarkan PICOC, khususnya

dari populasi dan intervensi, mengidentifikasi kata kunci pencarian berdasarkan research questions, menemukan kata kunci pencarian yang ada dalam judul, abstrak, dan kata kunci yang bersesuaian, mengidentifikasi persamaan kata, bentuk ejaan lain, dan lawan kata dari kata kunci pencarian, menggunakan struktur string pencarian dengan menerapkan Boolean operator *and dan or*.

String yang digunakan dalam pencarian adalah :

(Latest OR New OR Current) AND (Trend) AND (Advance* OR Progress OR Improve* OR Develop* OR Enhance*) AND (Digital Modulat*)*

Penyesuaian string kata kunci dilakukan namun yang asli tetap dipertahankan. String kata kunci kemudian disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dari basis data.

3.3. Pemilihan Studi

Parameter inklusi dan eksklusi dimanfaatkan untuk mengambil studi pokok. parameter ini diperlihatkan dalam tabel 3.

Tabel 3. Parameter Inklusi dan Eksklusi dalam SLR

Kriteria Inklusi	<ul style="list-style-type: none"> - Studi di ruang lingkup perkembangan modulasi digital dengan modulasi QAM. - Untuk terbitan duplikat mengenai studi yang serupa, diambil publikasi yang paling komprehensif dan terkini. - Pencarian dibatasi hanya pada studi yang diterbitkan dalam bahasa inggris.
Kriteria Eksklusi	<ul style="list-style-type: none"> - Studi yang meneliti dataset, metode, kerangka modulasi digital dalam konteks lain selain perkembangan modulasi digital. - Studi yang tidak ditulis dalam bahasa inggris.

Proses seleksi terdiri dari dua tahap yaitu pengecualian berdasarkan judul dan abstrak,

kemudian berdasarkan pemeriksaan menyeluruh terhadap teks lengkapnya..

3.4. Ekstraksi Data

Langkah ekstraksi data melibatkan pemilihan informasi dari 23 artikel yang terkumpul dan menempatkannya ke dalam tabel ringkasan ekstraksi data. Studi utama diekstraksi dengan mengumpulkan data yang akan digunakan sebagai jawaban atas pertanyaan penelitian (RQ). Ringkasan ekstraksi data diidentifikasi berdasarkan pertanyaan penelitian dan analisis yang dilakukan oleh peneliti, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4

Tabel 4 Ekstraksi Data

Properti	Pertanyaan Penelitian
Peneliti dan Publikasi	RQ1, RQ2
Tren dan Topik Penelitian	RQ3
Advancement	RQ4
Performance	RQ5
Strategic Planning	RQ6

3.5. Penelitian Kualitas Studi dan Sintesis Data

Tahap ini diterapkan sebagai panduan dalam sistesis data untuk memastikan kekuatan kesimpulan dan menghindari bias. Sintesis data memiliki tujuan untuk mengakumulasi bukti-bukti untuk menanggapi pertanyaan penelitian dari studi yang dipilih. Metode yang digunakan dalam sistesis data ini adalah metode naratif. Data disusun secara konsisten sesuai dengan pertanyaan penelitian. Visualisasi seperti diagram batang dan pie, kurva, dan tabel digunakan untuk mempresentasikan topik artikel.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

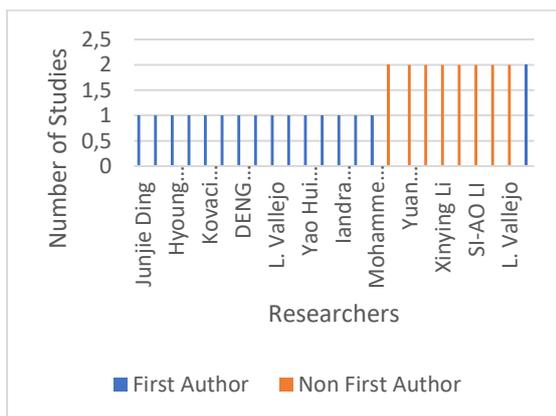
4.1. Publikasi yang Significant



Gambar 4 Distribusi studi terpilih selama periode 2012-2023

Dalam tinjauan komprehensif ini, 23 jurnal diteliti dalam konteks tren dan kemajuan terbaru dalam modulasi digital sistem telekomunikasi. Sebagian besar penelitian terjadi dalam dua belas tahun terakhir, antara 2012-2023, dan jurnal penelitian paling banyak dilakukan pada tahun 2020 dan 2022. Gambar 4 juga menunjukkan bahwa penelitian tentang kemajuan dalam bidang modulasi digital masih sangat relevan hingga saat ini.

4.2. Peneliti yang Paling Aktif dan Berpengaruh



Gambar 5 Jumlah penelitian yang paling berpengaruh

Dari literatur yang dipilih, diidentifikasi para peneliti yang membahas tentang tren dan kemajuan terkini dalam modulasi digital sistem telekomunikasi. Gambar 5 menunjukkan para peneliti yang paling aktif, yang disusun berdasarkan jumlah jurnal yang diterbitkan, dan dapat dicatat bahwa Sumaila

Mahama, L. Vallejo, Zhongqi Pan, Si-Ao Li, Jianjun Yu, Xinyinh Li, Fan li, Yuan Jianguo, dan Yahya Jasim H adalah peneliti paling aktif dalam modulasi digital.

4.3. Topik Penelitian

Perkembangan modulasi digital merupakan topik penelitian penting dalam bidang sistem telekomunikasi. Analisis dari studi primer yang dipilih menampakkan bahwa penelitian berfokus pada empat topik analisis kinerja format modulasi, penggunaan modulasi QAM dalam transmisi data, penerapan skema modulasi kode berbaris QAM, dan peningkatan efisiensi spektral.

Beberapa penelitian fokus pada aplikasi modulasi QAM dan PSK pada saluran optik, termasuk OWC, FSO, dan LOS-FSO channels. Penelitian ini mengevaluasi kinerja sistem pada panjang gelombang 1064 nm dengan menggunakan parameter BER dan Q-factor.

Selanjutnya, terdapat penelitian yang memeriksa kinerja modulasi 16-QAM menggunakan OFDM untuk transmisi data melalui saluran listrik. Penekanan pada penelitian ini adalah kemampuan OFDM untuk memulihkan konstelasi simbol dan mengurangi kesalahan simbol. Beberapa penelitian berfokus pada skema modulasi terkode, seperti skema dua tahap berbasis sinyal 8-QAM untuk sistem transmisi optic dan *turbo coded* 16-QAM bit allocation dalam saluran *Rice flat fading*. Skema metode ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja sistem dalam hal kesalahan bit.

Penelitian lain menggali efek bersamaan dari beberapa inovasi termasuk penggunaan modulasi QAM dalam komunikasi satelit dengan alat Simulink dan MATLAB, serta demonstrasi sistem VLC real-time menggunakan 16-QAM dengan perangkat keras yang terjangkau. Ada juga penelitian yang mengeksplorasi penggunaan *Probabilistically Shaped* 4096-ary QAM untuk transmisi kabel sinyal TeraHertz yang menghasilkan kecepatan 352-Gbit/s, memberikan efisiensi spektral yang tinggi.

Salah satu penelitian menunjukkan penggunaan sistem LTE-OFDM dengan

modulasi QAM pada frekuensi gelombang milimeter untuk transmisi data, yang menjanjikan kemampuan transmisi melalui infrastruktur optical fronthaul dengan kualitas yang baik. Begitu juga dengan desain perangkat keras simpul nirkabel yang mengoptimalkan skalabilitas transmisi nirkabel dan mobilitas fleksibel.

Terdapat juga penelitian yang berfokus pada pengurangan dampak noise fase pada modulasi digital 16-QAM terahertz dan memperkenalkan teknologi dalam sistem optik koheren dengan laju baud tinggi.

Penelitian dengan penekanan pada transmisi data tinggi termasuk pengiriman 30,7 Tb/s melalui WDM *channels* dan penggunaan *pulse non-ortogonal* FTN untuk modulasi QAM hingga 64K. Selain itu, ada penelitian yang mengembangkan filter prototipe untuk sistem QAM-FBMC menggunakan DPSS.

Terdapat penelitian yang mempertimbangkan efek penyimpanan penunjukkan, redaman turbulensi, dan kesalahan fase dalam sistem FSO menggunakan SC-QAM. Penelitian lain merancang *receiver* berbasis IIC untuk FBMC-QAM dan mengeksplorasi teknologi UWB dan PLC untuk transmisi berkecepatan tinggi di dalam ruangan. Terakhir, ada pengembangan algoritma dekoding bola kode Golden dengan kompleksitas rendah untuk M-QAM tingkat kepadatan tinggi.

4.4. Inovasi dan Kemajuan yang Dihasilkan

Penelitian di bidang modulasi digital telah memberikan inovasi dan kemajuan yang signifikan dalam penggunaan teknik modulasi digital. Misalnya, beberapa penelitian berfokus pada penggunaan modulasi seperti QAM dan PSK pada berbagai saluran komunikasi optik seperti OWC, FSO, dan LOS-FSO. Salah satu temuannya adalah mengoptimalkan sistem pada panjang gelombang 1064 nm, yang merupakan terobosan besar untuk aplikasi penyiaran video digital.

Selain itu, penelitian lain menyoroti penerapan metode OFDM dengan modulasi

16-QAM untuk transmisi data melalui saluran listrik, yang berhasil meningkatkan pemulihan konstelasi simbol dan mengurangi kesalahan simbol. Ada juga penelitian yang menggunakan skema modulasi terkode dua tahap (TSCM) untuk sistem transmisi optik, memanfaatkan karakteristik cincin 8-QAM untuk menghasilkan pengkodean yang lebih baik dan kinerja yang lebih tinggi pada tingkat kesalahan bit.

Beberapa inovasi lain termasuk penggunaan modulasi QAM dalam komunikasi satelit dengan alat Simulink dan MATLAB, serta demonstrasi sistem VLC *real-time* menggunakan 16-QAM dengan perangkat keras yang terjangkau. Ada juga penelitian yang mengeksplorasi penggunaan *Probabilistically Shaped* 4096-ary QAM untuk transmisi kabel sinyal TeraHertz yang menghasilkan kecepatan 352-Gbit/s, memberikan efisiensi spektral yang tinggi.

Salah satu penelitian menunjukkan penggunaan sistem LTE-OFDM dengan modulasi QAM pada frekuensi gelombang milimeter untuk transmisi data, yang menjanjikan kemampuan transmisi melalui infrastruktur optical fronthaul dengan kualitas yang baik. Begitu juga dengan desain perangkat keras simpul nirkabel yang mengoptimalkan skalabilitas transmisi nirkabel dan mobilitas fleksibel.

Inovasi lain termasuk kemampuan pengiriman data sebesar 30,7 Tb/s melalui serat optik tunggal sejauh 400 km, penggunaan *pulse non-ortogonal* FTN untuk meningkatkan *spectral efficiency*, dan pengembangan sistem komunikasi menggunakan teknologi *Ultra-Wide Band* dan *Power Line Communication* untuk meningkatkan efisiensi UWB dalam transmisi di dalam ruangan.

Semua inovasi ini membuka jalan bagi perkembangan sistem komunikasi yang lebih cepat, handal, dan efisien di masa depan, memberikan harapan untuk kemajuan yang signifikan dalam teknologi komunikasi global.

4.5. Strategi untuk Memperbaiki Sistem Telekomunikasi di Masa Depan

Untuk mengatasi tantangan dalam sistem telekomunikasi di masa depan, strategi yang diusulkan bertujuan untuk memperbaiki kualitas sistem dan menciptakan sistem yang adaptif dan tangguh. Beberapa strategi yang diusulkan seperti memanfaatkan inovasi-inovasi terbaru dalam modulasi seperti QAM dan PSK dan teknik pengkodean seperti TSCM dan turbo coding untuk meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan, mengurangi kesalahan, dan meningkatkan throughput data dalam berbagai lingkungan transmisi.

Kemudian juga pemanfaatan inovasi pada sistem optik dan gelombang terahertz untuk mengatasi keterbatasan bandwidth dan meningkatkan kecepatan transmisi. Strategi lainnya seperti pengoptimalan teknologi nirkabel menggunakan frekuensi gelombang milimeter (60 GHz dan 25 GHz) untuk sistem 5G, serta penggunaan teknologi seperti *Ultra-Wide Band (UWB)* dan *Power Line Communication (PLC)* untuk memperluas kapasitas komunikasi dalam ruangan.

Menggunakan berbagai inovasi ini akan memungkinkan pengembangan sistem telekomunikasi yang lebih efisien dan handal di masa depan.

4.6. Agenda Penelitian

Agenda penelitian untuk modulasi digital pada sistem telekomunikasi berfokus pada tren dan perkembangan terbaru yang sedang diteliti pada rentang tahun 2012-2023. Terdapat penelitian yang fokus pada analisis kinerja format modulasi seperti QAM dan PSK pada berbagai saluran komunikasi optik seperti OWC, FSO, dan LOS-FSO, dengan menemukan sistem yang optimal pada panjang gelombang tertentu.

Selanjutnya, beberapa penelitian memusatkan perhatian pada penggunaan modulasi 16-QAM dengan metode OFDM untuk transmisi data melalui saluran listrik atau pemanfaatan *visible light communications (VLC)* menggunakan modulasi QAM-16 dengan perangkat keras yang terjangkau. Selain itu, terdapat

penelitian yang mengeksplorasi aplikasi teknologi PS-4096QAM dalam transmisi kabel sinyal TeraHertz dan implementasi sistem komunikasi menggunakan teknologi M-QAM OFDM, baik dalam kondisi optimal maupun dalam situasi di mana terdapat ketidakseimbangan dalam sistem.

Ada pula penelitian yang berkaitan dengan penggunaan teknologi komunikasi dalam sistem optik dan kabel seperti penggunaan modulasi adaptif 4D dengan QAM heksagonal dalam sistem AMO-OFDM untuk meningkatkan efisiensi spektral pada *Passive Optical Network (PON)*. Selanjutnya, beberapa penelitian membahas sistem transmisi dengan menggunakan teknologi baru seperti *ultra-wide band (UWB)* dan *power line communication (PLC)* untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas transmisi pada kecepatan data tinggi di dalam ruangan. Terdapat pula penelitian yang memfokuskan pada pemahaman efek-efek lingkungan tertentu seperti turbulensi atmosfer terhadap sistem komunikasi optik dan FSO dengan modulasi SC-QAM pada aplikasi *broadband terrestrial*.

Selain itu, beberapa penelitian berfokus pada pengembangan teknologi deteksi dan dekoding yang efisien pada tingkat modulasi tinggi seperti 64-QAM, dengan tujuan mempercepat proses dekoding sinyal kompleks. Dalam bidang transmisi data dengan kecepatan tinggi, terobosan besar dicapai dengan berhasilnya pengiriman data sebesar 30,7 Tb/s melalui 40 saluran *Wave-Division Multiplexing*

(WDM) dengan hanya menggunakan amplifier Raman, memperlihatkan potensi transmisi data dalam jarak yang jauh tanpa pengulangan data.

5. KESIMPULAN

Dua puluh tiga artikel penelitian tentang tren dan perkembangan terbaru pada modulasi digital dipilih mengikuti kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditentukan. Tinjauan literatur ini, juga disebut Tinjauan

Literatur Sistematis (SLR), memerlukan identifikasi, evaluasi, dan interpretasi semua bukti penelitian yang dapat diakses untuk menjawab pertanyaan penelitian yang telah ditentukan. Penelitian tentang tren dan perkembangan terbaru pada modulasi digital telah berfokus pada beberapa area penelitian, yaitu: Inovasi terbaru dan penerapannya dalam meningkatkan efisiensi sistem, kinerja dari perkembangan yang diteliti, serta strategi untuk memperbaiki sistem telekomunikasi di masa depan. Dalam penelitian mengenai tren dan kemajuan terbaru dalam modulasi digital dihasilkan berbagai perkembangan yang diterapkan pada berbagai media transmisi yang menghasilkan banyak kemajuan seperti efisiensi spektral hingga optimalisasi kinerja sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Karpagarajesh, G., Santhana Krishnan, R., Harold Robinson, Y., Vimal, S., Kadry, S., & Nam, Y. (2022). "Investigation of digital video broadcasting application employing the modulation formats like QAM and PSK using OWC, FSO, and LOS-FSO channels". *Alexandria Engineering Journal*, 61(1), 647–657. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.038>
- Kumar, S., Kumar, N., & Jain, V. (2012). "Comparison of Various Auxiliary Signals for Damping Subsynchronous Oscillations Using TCR-FC". *Energy Procedia*, 14, 695–701. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.997>
- Qu, Z., & Djordjevic, I. B. (2017). "Two-stage cross-talk mitigation in an orbital-angular-momentum-based free-space optical communication system". *Optics Letters*, 42(16), 3125. <https://doi.org/10.1364/OL.42.003125>
- Usha, S. M., & Nataraj, K. R. (2016). "Bit Error Rate Analysis Using QAM Modulation for Satellite Communication Link". *Procedia Technology*, 25, 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.132>
- Fuada, S., Pradana, A., Adiono, T., & Popoola, W. O. (2023). "Demonstrating a real-time QAM-16 visible light communications utilizing off-the-shelf hardware". *Results in Optics*, 10, 100348. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100348>
- J. Ding, Y. Wang, J. Zhang, M. He, F. Zhao, L. Zhao, W. Zhou, Y. Shi, M. Zhu, and J. Yu, "Demonstration of 352-Gbit/s Single Line Rate PS-4096QAM THz Wired Transmission over Hollow-Core Fiber," *Opto-Electronics and Communications Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc*, 2021, <https://doi.org/10.1364/oecc.2021.t5a.1>
- U. Oruthota, O. Tirkkonen, "SER/BER expression for M-QAM OFDM systems with imperfect channel estimation and I/Q imbalance," *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-303>
- Park, H. J., Kang, S. M., Ha, I., and Han, S. K., "Hexagonal QAM-Based Four-Dimensional AMO-OFDM for Spectrally Efficient Optical Access Network Transmission," *IEEE Access*, 7, 176814–176819, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957844>
- Shiu, R. K., Chen, Y. W., Peng, P. C., Su, S. J., Shao, G. M., Chiu, J., Li J. W, Chang, G. K, "A Simplified Radio-Over-Fiber System for over 100-km Long-Reach n-QAM Transmission," *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 3, June. 2020, <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.2993180>
- K. Maria, B. Horia, "A study on turbo coded 16-QAM bit allocation in Rice flat fading channel", *In Procedia Computer Science*, vol. 56, pp. 300–308, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.212>
- Demeng, Z., Jianguo, Y., Zhe, W., Jing, Z., & Lele, S. (2018). A two-stage coded

- modulation scheme based on the 8-QAM signal for optical transmission systems. *Procedia Computer Science*, 131, 964–969.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.236>
- Li, F., Li, X., Zhang, J., & Yu, J. (2015). *Transmission of 100-Gb/s VSB DFT-Spread DMT Signal in Short-Reach Optical Communication Systems*. *IEEE Photonics Journal*, 7(5).
<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2486684>
- Deng, X., Yang, H., Qiuyu, W. U., Jiang, J., & Lin, C. (2022). *Phase Noise Effects on the Performance of High-Order Digital Modulation Terahertz Communication System*. *Chinese Journal of Electronics*, 31(3), 589–594.
<https://doi.org/10.1049/cje.2021.00.321>
- Li, S.-A., Huang, H., Pan, Z., Yin, R., Wang, Y., Fang, Y., Zhang, Y., Bao, C., Ren, Y., Li, Z., & Yue, Y. (2020). *Enabling Technology in High-Baud-Rate Coherent Optical Communication Systems*. *IEEE Access*, 8, 111318–111329.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003331>
- Vallejo, L., Ortega, B., Mora, J., Nguyen, D. N., Guerra, C., Bohata, J., Spacil, J., & Zvanovec, S. (2023). *Demonstration of M-QAM OFDM bidirectional 60/25 GHz transmission over 10 km Fiber, 100 m FSO and 2 m radio seamless heterogeneous fronthaul link*. *Optical Fiber Technology*, 77.
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103161>
- Wang, Y. H., & Li, Z. X. (2018). “Design of Wireless Node Based on AR9341”. *Procedia Computer Science*, 154, 416–423.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.06.059>
- Ibrahim, A., Bedeer, E., & Yanikomeroglu, H. (2021). “A Novel Low Complexity Faster-than-Nyquist (FTN) Signaling Detector for Ultra High-Order QAM”. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2, 2566–2580.
<https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3126805>
- Galdino, I., Zakaria, R., le Ruyet, Di., & Campos, M. L. R. (2022). “Prototype Filter for QAM-FBMC Systems Based on Discrete Prolate Spheroidal Sequences (DPSS)”. *IEEE Access*, 10, 31244–31254.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157304>
- Choi, B. H. (2023). “30.7 Tb/s Transmission over 400 km using 40 WDM channels of DP-16 QAM and Raman amplification without inline repeaters”. *Optical Fiber Technology*, 81.
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103520>
- Nguyen, T. v., Pham, T. v., Dang, N. T., & Pham, A. T. (2020). “Performance of generalized QAM/FSO systems with pointing misalignment and phase error over atmospheric turbulence channels”. *IEEE Access*, 8, 203631–203644.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3036643>
- Mahama, S., Harbi, Y. J., Burr, A. G., & Grace, D. (2020). “Design and convergence analysis of an IIC-Based BICM-ID receiver for F*BMC-QAM systems”. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1, 563–577.
<https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.2992314>
- Fattah, M., Abdellaoui, M., Daghouj, D., Mazer, S., el Ghazi, M., el Bekkali, M., Balboul, Y., & Bouayad, A. (2019). “Multi band OFDM alliance power line communication system”. *Procedia Computer Science*, 151, 1034–1039.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.146>
- Mthethwa, B., & Xu, H. (2022). “Low Complexity Golden Code Analytical and Deep Learning-Based Sphere-Decoders for High-Density M-QAM”. *IEEE Access*, 10, 6940–6953.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141626>

- Kitchenham, B., Pearl Brereton, O., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. In *Information and Software Technology* (Vol. 51, Issue 1, pp. 7–15).
<https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>
- Wahono, R. S. (2015). A Systematic Literature Review of Software Defect Prediction: Research Trends, Datasets, Methods and Frameworks. *Journal of Software Engineering*, 1(1).
<http://journal.ilmukomputer.org>
- Winch, R. G. (1998). *Telecommunication Transmission Systems* (2nd ed). McGraw-Hill.
- Penttinen, J. T. J. (Ed.). (2015). *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile, and Satellite Systems*. Wiley.
- Xiong, F. (2000). *Digital Modulation Techniques*. Artech House.