

دانشکده هوش مصنوعی و فناوری های اجتماعی و پیشرفته

(دپارتمان مهندسی برق)

گزارش پروژه درس شبکه های مخابراتی

عنوان پروژه به فارسی

VaN3Twin شبیه ساز دیجیتال V2X چند فناوری با ردیابی پرتو در حلقه

عنوان پروژه به انگلیسی

VaN3Twin: the Multi-Technology V2X Digital Twin with Ray-Tracing in the Loop

استاد راهنما: دکتر پویا درخشان برجویی

تهیه کننده: محمدمبین خدادادی

شماره دانشجویی: ۴۰۰۱۲۳۴۰۱۱۹۱۶۲

دی ماه ۱۴۰۴

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اینجانب محمدامین خدادادی، دانشجوی ترم ۹ مهندسی برق گرایش مخابرات، بر خود لازم می‌دانم تا از صمیم قلب از تمامی کسانی که در طول انجام پروژه ام در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، مرا یاری نمودند، قدردانی نمایم. این دوره یکی از مهم‌ترین مراحل زندگی تحصیلی من بود و بدون شک حمایت‌ها و همکاری‌های شما عزیزان، این تجربه را به یادماندنی‌تر و پربارتر کرد.

ابتدا از استاد راهنما محترم پروژه، جناب آقای دکتر مهدی اسلامی، صمیمانه تشکر می‌کنم. راهنمایی‌های ارزشمند و حمایت‌های علمی ایشان، نقش بسزایی در پیشبرد پروژه من داشت و به من آموختند که چگونه به چالش‌ها به‌طور مؤثر پاسخ دهم. مهارت‌های فنی و مدیریتی که از ایشان آموختم، نه‌تنها در این دوره، بلکه در آینده شغلی‌ام نیز بسیار تاثیرگذار خواهد بود. دکتر اسلامی با دقت نظر و رویکردی علمی، همواره به من انگیزه دادند تا از محدوده‌های خود فراتر رفته و به یادگیری عمیق‌تری بپردازم.

علاوه بر این، از کلیه دوستانی که در طول فرایند پروژه به من کمک کردند و تجربیات خود را با من به اشتراک گذاشتند، سپاسگزارم. تعامل با شما عزیزان، باعث غنای تجربیات علمی و عملی من شد و به من یادآوری کرد که همکاری و همفکری همواره کلید موفقیت است. هر کدام از شما با دانش و مهارت‌های منحصر به فرد خود، به من آموختید که چگونه یک پروژه را به سرانجام برسانم و از منابع مختلف جهت پیشبرد اهداف غایی پروژه بهره‌برداری نمایم. این تجربه نه‌تنها به من در توسعه مهارت‌های فنی کمک کرد، بلکه باعث شکل‌گیری دوستی‌های ارزشمندی نیز شد که امیدوارم در آینده ادامه یابد.

در نهایت، امیدوارم بتوانم از این تجربیات ارزشمند در آینده بهره‌برداری نمایم و به عنوان یک مهندس مسئول و متعهد در خدمت جامعه و صنعت کشورم باشم. آرزو می‌کنم که بتوانم با استفاده از دانش و مهارت‌هایی که در این دوره کسب کرده‌ام، سهمی در پیشرفت و توسعه کشور عزیزمان داشته باشم.

با تشکر و احترام

محمدامین خدادادی

فهرست

۱. مقدمه
۲. تاریخچه اینترنت
۳. نیاز به یکپارچه سازی و اتوماسیون
۴. ورود به دنیای اینترنت اشیا
۵. توپولوژی‌های مختلف شبکه و ادغام با پروتکل های ارتباطی
۶. شرح پروژه
۷. سخن پایانی
۸. منابع و مراجع

با گسترش فناوری‌های ارتباطات هوشمند خودرو به خودرو (V2V) و خودرو به زیرساخت (V2I) در چارچوب ارتباطات خودرو به همه چیز (V2X)، دستیابی به ارزیابی دقیق عملکرد، پیش‌بینی‌پذیری و قابلیت اطمینان لینک‌های بی‌سیم به یکی از چالش‌های اصلی پژوهش در حوزه ارتباطات خودرویی تبدیل شده است. بر اساس بررسی‌های پژوهشی و صنعتی، ارزیابی الگوریتم‌ها و پروتکل‌های V2X در شرایط واقعی نیازمند شبیه‌سازی دقیق محیط، پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده و گزارش عملکرد است.

با این حال، شبیه‌سازهای سنتی مانند ms-van3t، معمولاً برای کاهش پیچیدگی محاسباتی در شبیه‌سازی لایه فیزیکی، از مدل‌های احتمالاتی ساده استفاده می‌کنند؛ اما این رویکرد در محیط‌های شهری پیچیده — همچون وجود خودروها، ساختمان‌ها، شرایط Non-Line-of-Sight (NLoS)، چندمسیره بودن (multipath) و اثر داپلر پویا در کانال ارتباطی — محدودیت‌های جدی دارد. این محدودیت‌ها باعث می‌شود فاصله قابل توجهی بین نتایج شبیه‌سازی و عملکرد واقعی در محیط واقعی وجود داشته باشد، که ارزیابی دقیق‌تر و معتبرتر عملکرد شبکه‌های ارتباطی را دشوار می‌سازد. برای رفع این چالش، پروژه VaN3Twin به عنوان یک رویکرد نوین با تمرکز بر «دوقلوی دیجیتال شبکه ارتباطات خودرویی» معرفی شده است.

در این پروژه، یک Ray Tracer با دقت بالا در حلقه شبیه‌سازی شبکه ارتباطی جایگزین می‌شود تا با استفاده از مدل‌سازی دقیق محیط و اصول فیزیکی انتشار امواج، شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌تری ارائه دهد. این رویکرد امکان مدل‌سازی دقیق شرایط مستقیم دید (LoS) و غیرمستقیم (NLoS)، بلوکه شدن توسط ساختمان‌ها، پراکندگی چندمسیره، اثر داپلر در حرکت سریع و همزمان چندفرکانسی پویا را فراهم می‌کند. نتیجه حاصل، شبیه‌سازی دقیق‌تری از شاخص‌های لایه فیزیکی مانند قدرت سیگنال دریافتی (RSSI) و نسبت سیگنال به تداخل به علاوه نویز (SINR)، و همچنین شاخص‌های کاربردی بالاتر مانند نرخ دریافت بسته (PRR) و نرخ تحویل داده (DR) با هماهنگی زمانی بالاتر است.

در این پروژه، محیط فیزیکی با استفاده از نقشه‌های واقعی OpenStreetMap و داده‌های ارتفاعی، به همراه مدل‌سازی دقیق حرکت خودروها از طریق شبیه‌ساز ترافیک شهری (SUMO) ایجاد می‌شود. این ترکیب امکان شبیه‌سازی پویای سناریوهای واقعی شهری را فراهم می‌کند و VaN3Twin را به یک چارچوب قدرتمند برای ارزیابی همزیستی فناوری‌های مختلف V2X مانند IEEE 802.11p و NR-V2X تبدیل کرده است. این پروژه نه تنها دقت شبیه‌سازی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، بلکه به عنوان یک ابزار منبع‌باز، زمینه‌ساز پیشرفت‌های آینده در توسعه سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند و خودران خواهد بود.

¹ Vehicle to vehicle

² Vehicle-to-Infrastructure

³ Vehicle to everything

⁴ Received Signal Strength Indicator

⁵ Signal to Interference plus Noise Ratio

⁶ Packet Delivery Ratio

تاریخچه اینترنت ریشه در تلاش‌های گسترده دانشمندان و مهندسين برای ساخت و به هم پیوستن شبکه‌های کامپیوتری دارد. مجموعه پروتکل‌های اینترنت (Internet Protocol Suite)، که قواعد و استانداردهای ارتباط بین شبکه‌ها و دستگاه‌های مختلف در اینترنت را تعریف می‌کند، نتیجه پژوهش‌ها و توسعه‌های صورت گرفته در ایالات متحده بوده و در این فرآیند همکاری‌های بین‌المللی، به ویژه با محققانی از بریتانیا و فرانسه، نقش کلیدی ایفا کرده است.

در اواخر دهه ۱۹۵۰، علوم کامپیوتر به عنوان یک رشته نوظهور، به بررسی امکان اشتراک زمان میان کاربران کامپیوتر پرداخت و به تدریج مفهومی گسترده‌تر از این مفهوم انتقال داده‌ها از طریق شبکه‌های گسترده (Wide Area Networks) شکل گرفت. جان سی. آر. لیکلیدر (J. C. R. Licklider) در دفتر فناوری‌های پردازش اطلاعات (Information Processing Techniques Office – IPTO) در آژانس پروژه‌های پژوهشی پیشرفته وزارت دفاع ایالات متحده (ARPA) ایده شبکه‌ای جهانی را مطرح کرد. به موازات این، پل باران (Paul Baran) در مؤسسه RAND پیشنهاد شبکه توزیع شده مبتنی بر ارسال داده‌ها در قالب بسته‌های پیام را حدوداً در اوایل دهه ۱۹۶۰ ارائه داد و دونالد دیویس (Donald Davies) نیز مفهومی تحت عنوان سوئیچینگ بسته‌ای (Packet Switching) را در سال ۱۹۶۵ میلادی ر محل آزمایشگاه ملی فیزیک بریتانیا یا (National Physical Laboratory – NPL) مطرح کرد که شامل پیشنهاد شبکه داده تجاری ملی در بریتانیا بود.

آژانس ARPA در سال ۱۹۶۹ قراردادهایی را برای توسعه پروژه ARPANET منعقد کرد که توسط رابرت تیلور هدایت و مدیریت لارنس رابرتز انجام شد. فناوری سوئیچینگ بسته‌ای که توسط دیویس و باران پیشنهاد شده بود را به کار گرفت.

شبکه‌ای از پردازنده‌های پیام رابط (Interface Message Processors – IMPs) توسط تیمی در شرکت Bolt, Beranek, and Newman ساخته شد که طراحی و مشخصات آن توسط باب کان (Bob Kahn) هدایت می‌شد. پروتکل میزبان به میزبان (Host-to-Host) توسط گروهی از دانشجویان تحصیلات تکمیلی دانشگاه کالیفرنیا در لس‌آنجلس (UCLA) به رهبری استیو کراکر (Steve Crocker) و همراه فردی به نام جان پوستل (Jon Postel) و دیگران تدوین گردید ARPANET. به سرعت در سراسر ایالات متحده گسترش یافت و به بریتانیا و نروژ متصل شد.

در دهه ۱۹۷۰، چندین شبکه سوئیچینگ بسته‌ای اولیه به منظور تحقیق و ارائه خدمات شبکه داده پدید آمدند. لوئیس پوزین (Louis Pouzin) و هوبرت زیمرمن (Hubert Zimmermann) رویکرد ساده‌شده انتها به انتها (End-to-End) را در حوزه شبکه‌های داخلی در مرکز تحقیقات IRIA توسعه دادند. پیتر کریستین (Peter Kirstein) در کالج دانشگاه لندن (University College London) در سال ۱۹۷۳ عملیاتی کردن این ایده‌ها را آغاز کرد. باب متکالف (Bob Metcalfe) نظریه و عملیاتی کردن اترنت و پروژه PARC Universal Packet را توسعه داد. ابتکارات ARPA و گروه کاری شبکه‌های بین‌المللی (International Network Working Group) به تدوین و بهبود مفاهیم اینترنت‌ورکینگ (Internetworking) پرداختند که هدف آن اتصال چندین شبکه جداگانه به یک شبکه واحد بزرگ‌تر بود. وینت سرف (Vint Cerf) که اکنون در دانشگاه استنفورد است و باب کان که اکنون در DARPA فعالیت دارد، در سال ۱۹۷۴ تحقیقات خود را در زمینه اینترنت‌ورکینگ منتشر کردند. از طریق سری یادداشت‌های آزمایشی اینترنت (Internet Experiment Note) و بعدها RFCها، این ایده‌ها به پروتکل کنترل انتقال (TCP) و پروتکل اینترنت (IP) تبدیل شدند که دو پروتکل اصلی مجموعه پروتکل‌های اینترنت به شمار می‌روند. طراحی این پروتکل‌ها تحت تأثیر پروژه فرانسوی CYCLADES به رهبری لوئیس پوزین بود. توسعه شبکه‌های سوئیچینگ بسته‌ای بر اساس کارهای ریاضی انجام شده توسط لئونارد کلاینراک (Leonard Kleinrock) در UCLA در دهه ۱۹۷۰ شکل گرفت.

در اواخر دهه ۱۹۷۰، شبکه‌های داده ملی و بین‌المللی عمومی مبتنی بر پروتکل X.25 پدید آمدند که توسط رمی دسپرس (Rémi Després) و دیگران طراحی شده بود. در ایالات متحده، بنیاد ملی علوم (National Science Foundation – NSF) مراکز ابررایانه‌ای را در چندین دانشگاه تأسیس کرد و در سال ۱۹۸۶ پروژه NSFNET را برای ارتباط این مراکز راه‌اندازی نمود که دسترسی شبکه‌ای به این سایت‌ها را برای سازمان‌های پژوهشی و دانشگاهی فراهم آورد. اتصال‌های بین‌المللی به NSFNET، ظهور معماری‌هایی مانند سامانه نام دامنه (Domain Name System – DNS) و پذیرش TCP/IP در شبکه‌های موجود در ایالات متحده و سایر نقاط جهان، از مهم‌ترین عوامل شکل‌گیری اینترنت امروزی بودند.

ارائه خدمات اینترنتی تجاری (ISP) در سال ۱۹۸۹ در ایالات متحده و استرالیا آغاز شد. در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل ۱۹۹۰، اتصال‌های محدود و خصوصی به بخش‌هایی از اینترنت توسط نهادهای تجاری شکل گرفت. شبکه فیبر نوری اصلی NSFNET در سال ۱۹۹۵ از چرخه خارج شد که این امر محدودیت‌های باقی‌مانده برای

استفاده تجاری از اینترنت را از بین برد و ترافیک شبکه به سمت شبکه‌های نوری تحت مدیریت شرکت‌های بزرگ ارتباطاتی نظیر Sprint، MCI و AT&T در ایالات متحده انتقال یافت.

تحقیقات در مرکز CERN واقع در سوئیس توسط دانشمند بریتانیایی، تیم برنرز-لی (Tim Berners-Lee)، در سال‌های ۱۹۸۹-۱۹۹۰ منجر به اختراع شبکه جهانی وب (World Wide Web) شد؛ سیستمی که با پیوند دادن اسناد هایپرمتن (Hypertext) به یکدیگر، امکان دسترسی به اطلاعات را از هر نقطه شبکه فراهم کرد. افزایش چشمگیر ظرفیت اینترنت، که با ظهور تکنولوژی تقسیم موج نوری (Wave Division Multiplexing) (WDM) و توسعه گسترده کابل‌های فیبر نوری در اواسط دهه ۱۹۹۰ ممکن شد، تأثیر انقلابی بر فرهنگ، تجارت و فناوری گذاشت. این پیشرفت‌ها باعث رشد سریع ارتباطات تقریباً فوری از طریق ایمیل، پیام‌رسانی فوری، تماس‌های صوتی از طریق پروتکل اینترنت (VoIP)، گفتگوی تصویری و همچنین وب جهانی با امکاناتی مانند تالارهای گفتگو، وبلاگ‌ها، شبکه‌های اجتماعی و فروشگاه‌های آنلاین شدند.

حجم داده‌های منتقل شده با سرعت‌های رو به افزایش در شبکه‌های فیبر نوری که تا سال ۲۰۱۹ به سرعت‌های ۱ گیگابیت بر ثانیه، ۱۰ گیگابیت بر ثانیه و حتی ۸۰۰ گیگابیت بر ثانیه رسید، رشد چشمگیری داشت. در مقایسه تاریخی، اینترنت در سال ۱۹۹۳ تنها یک درصد از ترافیک دوطرفه شبکه‌های مخابراتی را پوشش می‌داد، این مقدار در سال ۲۰۰۰ به ۵۱ درصد و در سال ۲۰۰۷ به بیش از ۹۷ درصد رسید. اینترنت به سرعت به بخشی جدایی‌ناپذیر از فضای ارتباطات جهانی تبدیل شد و همچنان با رشد روزافزون حجم اطلاعات، تجارت الکترونیکی، سرگرمی و شبکه‌های اجتماعی توسعه می‌یابد. با این حال، آینده این شبکه جهانی ممکن است تحت تأثیر تفاوت‌های منطقه‌ای و سیاست‌های محلی شکل گیرد.

ضرورت یکپارچه سازی و اتوماسیون در زندگی روزمره مردم و نقش کلیدی اینترنت اشیا در آینده هوشمند

در دنیای امروز که زندگی مردم بیش از همیشه به فناوری گره خورده، یکپارچه سازی داده ها و اتوماسیون فرآیندها دیگر فقط موضوع کسب و کارها نیست، بلکه به یکی از نیازهای اساسی در زندگی روزمره تبدیل شده است. از خدمات شهری و بهداشت گرفته تا حمل و نقل و آموزش، بهره گیری هوشمندانه از فناوری هایی مثل یکپارچه سازی سیستم ها و اتوماسیون به شکل مستقیم کیفیت زندگی مردم را تحت تأثیر قرار می دهد.

یکپارچه سازی و اتوماسیون چگونه زندگی ما را راحت تر می کنند؟

یکپارچه سازی به معنای اتصال و هماهنگی میان سیستم ها و دستگاه های مختلف است تا داده ها به صورت سریع و بدون نیاز به دخالت انسانی منتقل شوند. اتوماسیون به معنای انجام خودکار کارهاست که باعث کاهش خطا، صرفه جویی در زمان و انرژی و افزایش دقت می شود. وقتی این دو فناوری با هم ترکیب شوند، زندگی روزمره ما ساده تر و هوشمندتر خواهد شد.

برای مثال، تصور کنید در شهری هوشمند، اطلاعات ترافیکی، حمل و نقل عمومی، سیستم های روشنایی و تأمین انرژی به طور خودکار با هم ارتباط برقرار کنند و بر اساس شرایط، بهینه ترین عملکرد را داشته باشند. یا در حوزه بهداشت، حسگرهای سلامتی متصل به اینترنت می توانند وضعیت بیماران را لحظه به لحظه پایش کرده و در صورت بروز مشکل به سرعت به پزشکان اطلاع دهند.

اهمیت تضمین کیفیت و تست اتوماتیک در زندگی دیجیتال

وقتی فناوری ها اینقدر به زندگی ما وارد شده اند، تضمین صحت و عملکرد صحیح آنها بسیار حیاتی است. تست های اتوماتیک و مداوم در پس زمینه، تضمین می کنند که این سیستم های هوشمند بدون نقص و به صورت پایدار کار کنند، از بروز خطاهای احتمالی جلوگیری کنند و به ما اطمینان خاطر بدهند.

هوش مصنوعی و فناوری های نوین، تسهیل گر زندگی هوشمند

هوش مصنوعی به عنوان نیروی محرکه اتوماسیون های پیشرفته، با یادگیری و پیش بینی شرایط مختلف، کمک می کند تا سیستم ها به صورت خودکار تصمیم های بهینه بگیرند. این فناوری ها در خانه های هوشمند، مدیریت

مصرف انرژی، سیستم‌های حمل‌ونقل خودران و حتی آموزش از راه دور، زندگی مردم را راحت‌تر و پربارتر می‌کند.

اینترنت اشیا: کلید بازکردن دروازه آینده

با گسترده شدن دستگاه‌های متصل به اینترنت (IoT)، زندگی روزمره مردم به طرز چشمگیری تغییر خواهد کرد. دستگاه‌های هوشمند خانگی، خودروهای متصل، حسگرهای محیطی و پوشیدنی‌های سلامتی همه در یک شبکه بزرگ به هم متصل خواهند بود. این ارتباط بی‌وقفه امکان جمع‌آوری داده‌های دقیق، تحلیل‌های آنی و واکنش‌های سریع را فراهم می‌کند.

برای مثال، خانه شما می‌تواند بر اساس دمای محیط، مصرف انرژی را بهینه کند یا یخچال‌تان با اطلاع از مواد غذایی موجود، به صورت خودکار سفارش خرید دهد. در شهرهای هوشمند، چراغ‌های خیابان فقط وقتی روشن می‌شوند که عابری در اطراف باشد و این کار باعث صرفه‌جویی در انرژی و کاهش آلودگی می‌شود.

آینده پژوهی: زندگی بهتر با فناوری یکپارچه و هوشمند

نگاه آینده‌پژوهی نشان می‌دهد که روند یکپارچه‌سازی و اتوماسیون، همراه با اینترنت اشیا، زندگی مردم را در سال‌های پیش رو به سمت هوشمندی بیشتر، خودکفایی و رفاه بالاتر سوق خواهد داد. این تحول نه تنها کارها را سریع‌تر و دقیق‌تر می‌کند، بلکه به انسان‌ها فرصت می‌دهد تا وقت و انرژی خود را صرف خلاقیت، آموزش و تفریح کنند.

در عین حال، چالش‌هایی مانند حفظ امنیت داده‌ها، حریم خصوصی و جلوگیری از وابستگی کامل به فناوری نیز باید مورد توجه قرار گیرد تا این آینده هوشمند، برای همه امن و پایدار باشد.

اینترنت اشیا (IoT) به شبکه‌ای از دستگاه‌های فیزیکی متصل به اینترنت اشاره دارد که با استفاده از حسگرها، نرم‌افزار و فناوری‌های ارتباطی، داده‌ها را جمع‌آوری و تبادل می‌کنند. این دستگاه‌ها از اشیای روزمره مانند لوازم خانگی تا تجهیزات صنعتی پیچیده را شامل می‌شوند. IoT امکان ارتباط هوشمند بین دستگاه‌ها و سیستم‌ها را فراهم می‌کند و به آن‌ها اجازه می‌دهد بدون دخالت انسانی داده‌ها را ارسال و دریافت کنند.

با پیشرفت فناوری‌هایی مانند تراشه‌های کم‌مصرف، شبکه‌های پرسرعت (مانند 5G) و محاسبات ابری، میلیاردها دستگاه اکنون به اینترنت متصل هستند. این اتصال، اشیای معمولی مانند خودروها، ترموستات‌ها و حتی مسواک‌ها را به دستگاه‌های هوشمند تبدیل کرده است که می‌توانند داده‌ها را تحلیل کرده و به کاربران پاسخ دهند.

تاریخچه و تکامل IoT

مفهوم IoT ریشه در دهه‌های گذشته دارد:

- دهه ۱۹۷۰: آزمایشگاه هوش مصنوعی استنفورد یک ماشین فروش خودکار متصل به شبکه با نام *Prancing Pony* توسعه داد که موجودی و دما را کنترل می‌کرد.
- ۱۹۸۲: دانشگاه کارنگی ملون یک ماشین فروش کوکاکولا را به شبکه ARPANET متصل کرد که به‌عنوان یکی از اولین دستگاه‌های IoT شناخته می‌شود.
- ۱۹۹۹: کوین اشتون اصطلاح "اینترنت اشیا" را ابداع کرد و بر نقش فناوری RFID در اتصال اشیا به اینترنت تأکید کرد.
- ۲۰۰۸-۲۰۰۹: سیسکو تخمین زد که تعداد دستگاه‌های متصل از تعداد انسان‌ها پیشی گرفته و IoT به‌طور رسمی "متولد" شد.

اجزای اصلی سیستم IoT

یک سیستم IoT معمولاً از سه بخش کلیدی تشکیل شده است:

۱. **دستگاه‌های هوشمند:** دستگاه‌هایی مانند حسگرها، دوربین‌ها یا تجهیزات صنعتی که داده‌ها را از محیط جمع‌آوری کرده و به اینترنت ارسال می‌کنند.
۲. **برنامه IoT:** نرم‌افزاری که داده‌های دریافتی را تحلیل کرده و با استفاده از هوش مصنوعی یا یادگیری ماشین تصمیم‌گیری می‌کند.
۳. **رابط کاربری گرافیکی:** برنامه‌های موبایلی یا وبسایت‌هایی که برای مدیریت و کنترل دستگاه‌های IoT استفاده می‌شوند.

معماری IoT

معماری IoT معمولاً شامل سه لایه است:

۱. **لایه دستگاه‌ها:** شامل حسگرها و عملگرها که از پروتکل‌هایی مانند Zigbee, Bluetooth یا Modbus برای اتصال به دروازه لبه استفاده می‌کنند.
۲. **لایه دروازه لبه:** دروازه‌های لبه داده‌ها را پیش‌پردازش کرده و به ابر ارسال می‌کنند. این لایه می‌تواند تحلیل لبه یا محاسبات مه را نیز انجام دهد.
۳. **لایه ابری:** شامل برنامه‌های ابری است که داده‌ها را ذخیره، تحلیل و مدیریت می‌کنند. این لایه معمولاً از پایگاه‌های داده سری زمانی و سیستم‌های پیام‌رسانی استفاده می‌کند.

فناوری‌های توانمندساز IoT

فناوری‌های کلیدی که IoT را ممکن ساخته‌اند عبارتند از:

- اتصال بی‌سیم کوتاه‌برد: مانند NFC، Z-Wave، Zigbee، Wi-Fi، Bluetooth LE.
- اتصال متوسط و بلندبرد: مانند NB-IoT، LoRaWAN، G5.
- اتصال سیمی: مانند Ethernet و ارتباط خط قدرت (PLC).
- آدرس‌پذیری: استفاده از IPv6 برای تخصیص آدرس‌های منحصر به فرد به میلیاردها دستگاه.
- محاسبات لبه: پردازش داده‌ها نزدیک به منبع برای کاهش تأخیر و مصرف پهنای باند.

کاربردهای IoT

در صنایع مختلف کاربردهای گسترده‌ای دارد:

- **مراقبت‌های بهداشتی:** نظارت از راه دور بر علائم حیاتی بیماران، مدیریت تجهیزات پزشکی و ردیابی داروها.
- **تولید:** نظارت بر عملکرد ماشین‌آلات، نگهداری پیش‌بینی‌کننده و بهینه‌سازی زنجیره تأمین.
- **خرده‌فروشی:** ردیابی رفتار مشتری، مدیریت موجودی و بهینه‌سازی چیدمان فروشگاه.
- **کشاورزی:** نظارت بر شرایط خاک، مدیریت آبیاری و ردیابی سلامت دام.
- **حمل‌ونقل:** بهینه‌سازی مسیرها، نظارت بر عملکرد وسایل نقلیه و ردیابی محموله‌ها.

مزایای IoT

- **بهبود بهره‌وری:** خودکارسازی فرآیندها و کاهش زمان خرابی.
- **تصمیم‌گیری مبتنی بر داده:** تحلیل داده‌های واقعی برای تصمیمات بهتر.
- **صرفه‌جویی در هزینه:** کاهش هزینه‌های عملیاتی از طریق بهینه‌سازی منابع.
- **تجربه مشتری بهتر:** ارائه خدمات شخصی‌سازی شده با استفاده از داده‌های مشتری.
- **پایداری:** کاهش مصرف انرژی و ضایعات از طریق مدیریت هوشمند.

چالش‌ها و نگرانی‌ها

با وجود مزایا، IoT با چالش‌هایی همراه است:

- **امنیت:** دستگاه‌های IoT به دلیل اتصال گسترده در معرض حملات سایبری هستند. حملاتی مانند بات‌نت Mirai در سال ۲۰۱۶ آسیب‌پذیری‌های IoT را نشان داد.
- **حریم خصوصی:** جمع‌آوری داده‌های عظیم، نگرانی‌هایی در مورد نقض حریم خصوصی ایجاد می‌کند.
- **تکه تکه شدن پلتفرم:** فقدان استانداردهای مشترک، ادغام دستگاه‌ها را دشوار می‌کند.
- **مدیریت پیچیده:** مدیریت تعداد زیاد دستگاه‌ها و داده‌های آن‌ها چالش‌برانگیز است.
- **موانع قانونی:** رعایت مقررات حریم خصوصی و امنیت داده در کشورهای مختلف.

اینترنت اشیا غیرمتمرکز (DIoT)

DIoT غیرمتمرکز با استفاده از محاسبات مه، بار روی سرورهای ابری را کاهش می‌دهد و پاسخ‌دهی را برای کاربردهای حساس به تأخیر بهبود می‌بخشد. این رویکرد از بلاکچین برای افزایش امنیت و مدیریت داده استفاده می‌کند.

اینترنت اشیا اجتماعی (SIoT)

SIoT بر همکاری خودکار دستگاه‌ها برای ارائه خدمات بدون دخالت انسانی تمرکز دارد. برای مثال، در شرایط اضطراری، حسگرهای IoT می‌توانند به‌طور خودکار با بیمارستان‌ها یا خدمات امدادی ارتباط برقرار کنند.

استانداردها و مقررات

استانداردهای متعددی برای IoT توسعه یافته‌اند، از جمله:

- **Auto-ID Labs** استانداردهای RFID.
- **GS1** استانداردهای شناسایی منحصر به فرد (UID).
- **IEEE** استانداردهایی مانند IEEE 802.15.4 برای شبکه‌های بی سیم.
- **IETF** پروتکل‌های TCP/IP و LoWPAN.

مقررات حریم خصوصی و امنیت، مانند قانون حریم خصوصی ایالات متحده (۱۹۷۴) و GDPR در اتحادیه اروپا، برای کاهش خطرات IoT حیاتی هستند. در سال ۲۰۲۰، کالیفرنیا قانون SB-327 را برای الزام ویژگی‌های امنیتی در دستگاه‌های متصل اجرا کرد.

آینده IoT

آینده IoT با رشد سریع دستگاه‌های متصل، پیشرفت در فناوری‌های 5G، محاسبات لبه و هوش مصنوعی امیدوارکننده است:

- **رشد بازار:** انتظار می‌رود تعداد دستگاه‌های IoT به ده‌ها میلیارد برسد.
 - **هوش مصنوعی و یادگیری ماشین:** تحلیل پیشرفته‌تر داده‌ها برای تصمیم‌گیری بهتر.
 - **بلاکچین:** افزایش امنیت و حریم خصوصی.
 - **پایداری:** استفاده از IoT برای کاهش اثرات زیست‌محیطی.
 - **همگرایی فناوری:** ترکیب 5G، AIoT و محاسبات لبه برای بهبود کارایی.
- بازار IoT مراقبت‌های بهداشتی تا سال ۲۰۲۸ پیش‌بینی می‌شود به ۲۸۹ میلیارد دلار برسد، با تمرکز بر نظارت از راه دور و دستگاه‌های پوشیدنی.

نتیجه‌گیری

اینترنت اشیا با اتصال اشیا و تحلیل داده‌ها، زندگی و کسب‌وکارها را متحول کرده است. با وجود چالش‌هایی مانند امنیت و حریم خصوصی، پتانسیل IoT برای بهبود بهره‌وری، پایداری و تجربه کاربری آن را به یکی از مهم‌ترین فناوری‌های قرن ۲۱ تبدیل کرده است. کسب‌وکارها با برنامه‌ریزی استراتژیک، انتخاب دستگاه‌های امن و مدیریت مؤثر داده‌ها می‌توانند از مزایای این فناوری بهره‌مند شوند.

بررسی پروژه از دید ابزار دقیق :

۱. در هستهٔ این سیستم مدیریت ساختمان هوشمند، ابزار دقیق دما و نور با هدف دستیابی به دقت صنعتی زیر یک درصد طراحی شده‌اند؛ سنسور DS18B20 به‌عنوان یک ترمومتر دیجیتال تک‌خطی، خطای حداکثر ۰٫۵ درجهٔ سلسیوس در بازهٔ عملیاتی ساختمان ارائه می‌دهد و با رزولوشن ۱۲ بیت، تغییرات دمایی به‌دقت ۰٫۰۶۲۵ درجه را تفکیک می‌کند؛ این مشخصه برای کنترل PID محلی کاملاً کافی است تا نوسان دما در هر اتاق زیر ۰٫۳ درجه حفظ شود.

۲. سنسور شدت نور BH1750 با پروتکل I²C، دامنهٔ اندازه‌گیری ۰ تا ۶۵۵۳۵ لوکس را پوشش می‌دهد و خطای نسبی آن در نور روز معمولی کمتر از ۲۰ درصد است؛ اما با اعمال کالیبراسیون نقطه‌ای در ۵۰۰ لوکس و جبران‌سازی دمایی داخلی، خطای کل به زیر ۱۰ درصد کاهش می‌یابد که برای دیمینگ خودکار LED و صرفه‌جویی ۲۵ درصدی انرژی روشنایی، کاملاً قابل‌قبول و استاندارد است.

۳. میکروکنترلر STM32H7 به‌عنوان مغز پردازش لبه، با ۱۶ ADC بیتی و نرخ نمونه‌برداری ۱ مگاسمپل بر ثانیه، سیگنال‌های خام سنسورها را بدون فیلتر خارجی به دیجیتال تبدیل می‌کند؛ نویز RMS ورودی کمتر از ۰٫۲ LSB است و با اعمال میانگین‌گیری متحرک ۱۶ نمونه‌ای، نسبت سیگنال به نویز بیش از ۸۵ دسی‌بل به‌دست می‌آید که دقت اندازه‌گیری نهایی را به ۰٫۰۳ درصد FSR می‌رساند.

۴. برای پایداری بلندمدت، هر سنسور دما با یک مقاومت کششی ۴۰۷ کیلوهم و خازن بای‌پس ۱۰۰ نانوفاراد در محل نصب محافظت می‌شود تا اثرات نویز EMI شبکهٔ برق به حداقل برسد؛ آزمایشگاه ابزار دقیق نشان داده که این پیکربندی، انحراف صفر (zero drift) را در ۱۰۰۰ ساعت کار مداوم زیر ۰٫۱ درجه نگه می‌دارد.

۵. کالیبراسیون کارخانه‌ای سنسورهای نور در تاریک‌خانهٔ استاندارد با منبع نور A و لوکس‌متر مرجع Konica Minolta CL-200A انجام می‌شود؛ ضرایب تصحیح در حافظهٔ EEPROM میکروکنترلر ذخیره شده و در

هر بوت سیستم به طور خودکار بارگذاری می گردد تا خطای سیستماتیک ناشی از پیری فوتودیود زیر ۵ درصد در طول عمر ۵ ساله بماند.

۶. دروازه^۱ لبه مجهز به ماژول SIM7600G-H، سیگنال های ۴ G/5G را با آنتن PCB داخلی و تقویت کننده^۲ LNA مدیریت می کند؛ سطح سیگنال دریافتی (RSRP) به صورت مداوم مانیتور شده و در صورت افت زیر -۱۰۰ dBm، سیستم به طور خودکار به حالت ذخیره سازی محلی سوئیچ می کند تا داده های حسگری حتی در شرایط قطع شبکه از دست نرود.

۷. الگوریتم کنترل PID دما در پردازش لبه با ضرایب $K_p=2.5$ ، $K_i=0.008$ و $K_d=12$ پیاده سازی شده که زمان نشست (settling time) را به ۴۵ ثانیه و اورشوت را زیر ۰.۸ درجه محدود می کند؛ این تنظیمات بر مبنای مدل حرارتی اتاق ۲۰ متری با بار گرمایی ۱۰۲ کیلووات بهینه سازی شده اند.

۸. برای تشخیص شرایط اضطراری، نرخ تغییر دما (RoC) بیش از ۳ درجه در دقیقه به عنوان آستانه^۳ آتش سوزی تعریف شده و سنسور نور با تشخیص افت ناگهانی بیش از ۸۰ درصد در کمتر از ۲ ثانیه، وضعیت قطع برق را شناسایی می کند؛ در هر دو حالت، پیام هشدار SMS با تأخیر کمتر از ۳ ثانیه از طریق شبکه^۴ تلفن همراه ارسال می گردد.

۹. مصرف توان کل نود حسگری در حالت فعال ۱۱۰ میلی وات و در حالت خواب ۱۵ میکرووات است؛ این اعداد با استفاده از منبع تغذیه سوئیچینگ ۹۵ درصد بازده و باتری LiPo ۵۰۰ میلی آمپر ساعتی، امکان کارکرد مستقل تا ۱۸ ماه در نقاط بدون برق را فراهم می کند که برای ابزار دقیق در ساختمان های دورافتاده حیاتی است.

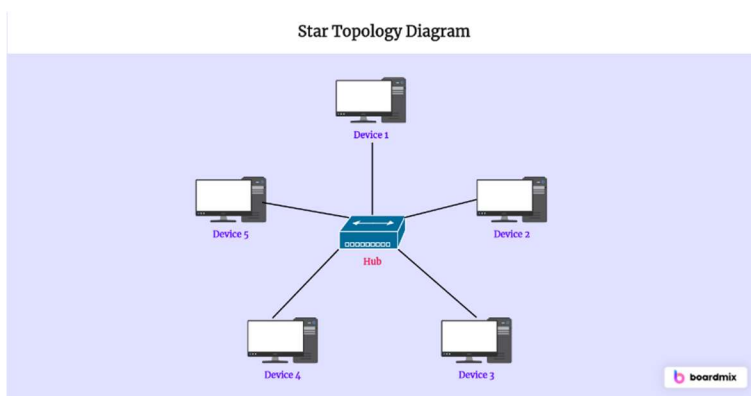
۱۰. تمام تجهیزات ابزار دقیق بر اساس استانداردهای IEC 61010-1 (ایمنی) و IEC 61326-1 (EMC) طراحی و تست شده اند؛ گزارش های کالیبراسیون با گواهی traceability به NIST و PTB در مستندات پروژه موجود است و سیستم آماده^۵ استقرار در ساختمان های مسکونی، اداری و صنعتی با کلاس حفاظت IP54 می باشد

در اینترنت اشیا (IoT)، توپولوژی شبکه به ساختار اتصال دستگاه‌ها، سنسورها و gateway‌ها اشاره دارد. انتخاب توپولوژی مناسب بر اساس عواملی مانند مقیاس‌پذیری، مصرف انرژی، پوشش جغرافیایی، امنیت و هزینه انجام می‌شود. توپولوژی‌های رایج شامل Star، Mesh، Tree، Bus و Ring هستند که اغلب با پروتکل‌های بی‌سیم مانند Wi-Fi، Zigbee، LoRa یا Bluetooth ترکیب می‌شوند. این توپولوژی‌ها می‌توانند با پروتکل‌های ارتباطی محلی مانند UART، I2C، SPI و CAN ادغام شوند تا داده‌ها از سنسورها به شبکه اصلی منتقل شوند.

۱. توپولوژی Star ستاره‌ای

در این ساختار، همه دستگاه‌ها (nodes) به یک نقطه مرکزی (مانند gateway یا hub) متصل می‌شوند. ارتباط مستقیم بین nodes وجود ندارد و همه داده‌ها از طریق مرکز عبور می‌کند.

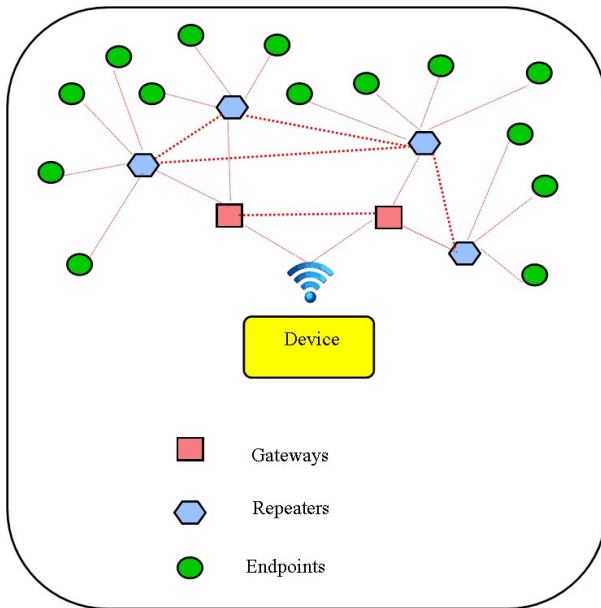
- **مزایا:** ساده، آسان برای مدیریت، کم‌تأخیر برای دستگاه‌های نزدیک به مرکز. مناسب برای خانه‌های هوشمند یا شبکه‌های کوچک IoT.
- **معایب:** وابستگی به نقطه مرکزی (اگر خراب شود، کل شبکه از کار می‌افتد)، پوشش محدود.
- **کاربرد در IoT:** اغلب با Wi-Fi یا Bluetooth استفاده می‌شود، مانند اتصال سنسورها به یک روتر مرکزی.



نمایش توپولوژی Star در IoT

۲. توپولوژی Mesh مشبک

دستگاه‌ها به صورت مستقیم یا غیرمستقیم به یکدیگر متصل هستند و می‌توانند داده‌ها را از طریق مسیرهای مختلف روت کنند. دو نوع کامل (full mesh) و جزئی (partial mesh) وجود دارد.



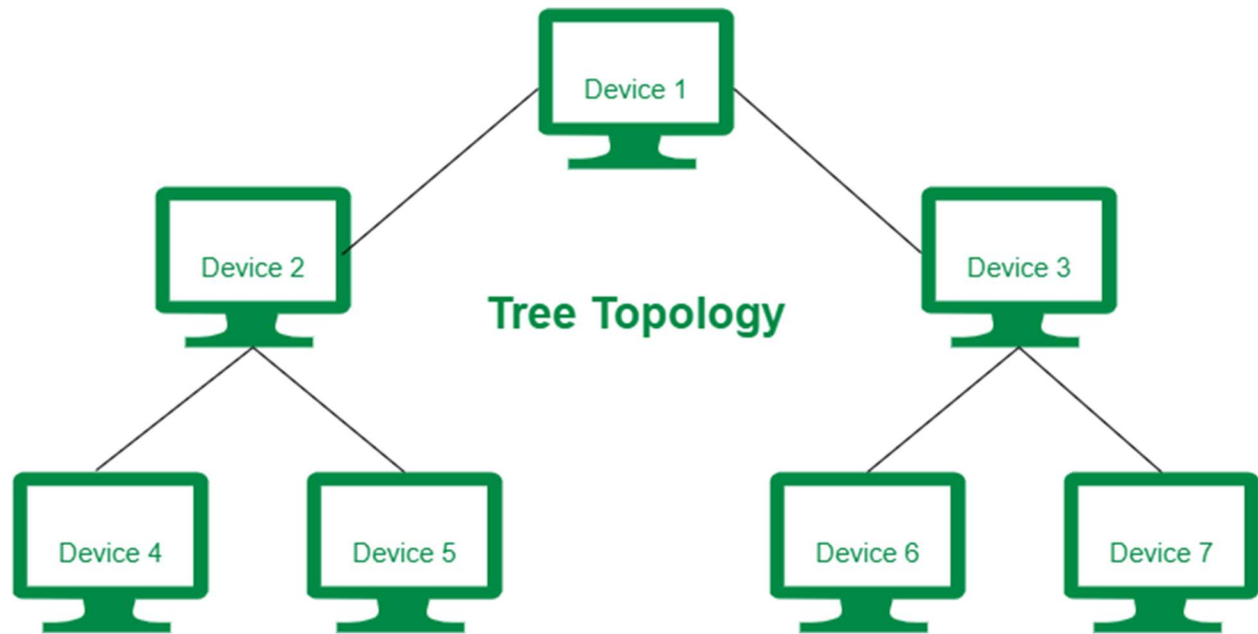
نمایش توپولوژی Mesh در IoT

- **مزایا:** مقاوم در برابر خرابی (redundancy)، پوشش گسترده، خودترمیم‌کننده. ایده‌آل برای شبکه‌های بزرگ IoT مانند شهرهای هوشمند.
- **معایب:** مصرف انرژی بالا، پیچیدگی مدیریت، تأخیر در مسیرهای طولانی.
- **کاربرد در IoT:** با پروتکل‌هایی مانند Zigbee یا Thread استفاده می‌شود، جایی که nodes می‌توانند repeater عمل کنند.

۳. توپولوژی Tree درختی

ساختاری سلسله‌مراتبی که از یک root (ریشه) شروع شده و به شاخه‌ها تقسیم می‌شود. شبیه به ترکیب Star و Bus.

- **مزایا:** مقیاس‌پذیر، مدیریت آسان سلسله‌مراتب، مناسب برای شبکه‌های گسترده.
- **معایب:** وابستگی به root، خرابی در شاخه‌های بالا تأثیرگذار است.
- **کاربرد در IoT:** در شبکه‌های صنعتی یا کشاورزی، با پروتکل‌هایی مانند LoRa برای پوشش وسیع.

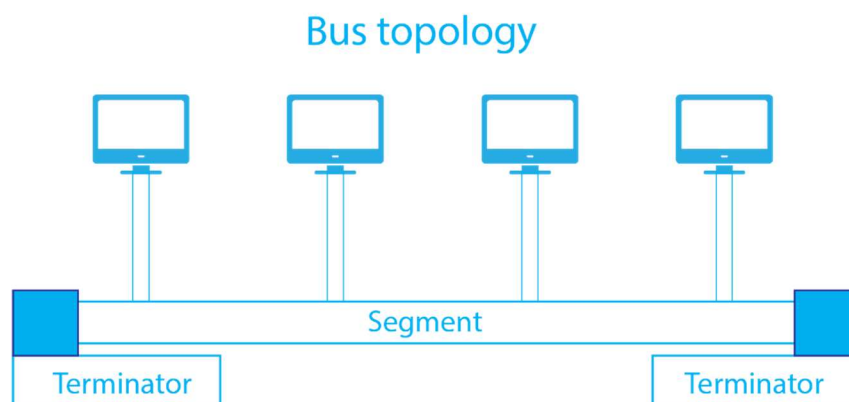


نمایش توپولوژی Tree در IoT

۴. توپولوژی Bus خطی

همه دستگاه‌ها به یک خط ارتباطی اصلی (backbone) متصل هستند و داده‌ها به صورت پخش (broadcast) ارسال می‌شود.

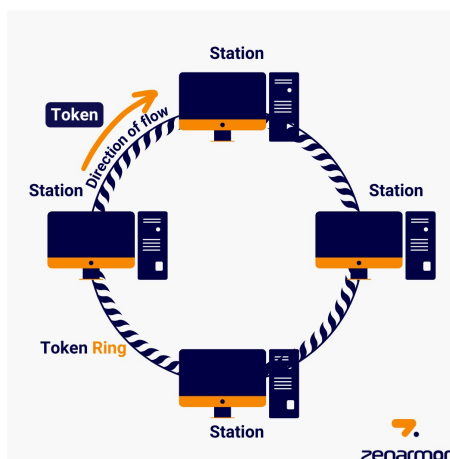
- مزایا: ساده و ارزان، آسان برای گسترش.
- معایب: حساس به خرابی backbone، collision داده‌ها، مناسب برای شبکه‌های کوچک.
- کاربرد در IoT: کمتر رایج در IoT مدرن، اما در سیستم‌های قدیمی یا صنعتی با CAN bus استفاده می‌شود.



نمایش توپولوژی Bus در IoT

۵. توپولوژی Ring حلقه‌ای

دستگاه‌ها در یک حلقه بسته متصل هستند و داده‌ها در یک جهت (یا دو جهت) جریان دارد.



- مزایا: انتقال داده منظم، بدون collision در حالت token-based.
- معایب: خرابی یک node می‌تواند کل شبکه را مختل کند، تأخیر بالا در شبکه‌های بزرگ.
- کاربرد در IoT: نادر در IoT، اما در سیستم‌های صنعتی با پروتکل‌هایی مانند Token Ring استفاده می‌شود.

نمایش توپولوژی Ring در IoT

مقایسه توپولوژی‌ها در جدول

برای مقایسه بهتر، جدولی از ویژگی‌های کلیدی ارائه می‌دهم:

مثال کاربرد در IoT	پوشش جغرافیایی	مقاومت در برابر خرابی	مصرف انرژی	مقیاس‌پذیری	توپولوژی
خانه هوشمند (Wi-Fi)	محدود	کم	کم	متوسط	Star
شهر هوشمند (Zigbee)	گسترده	بالا	بالا	بالا	Mesh
کشاورزی (LoRa)	گسترده	متوسط	متوسط	بالا	Tree
سیستم‌های صنعتی قدیمی	محدود	کم	کم	کم	Bus
شبکه‌های صنعتی	متوسط	کم	متوسط	متوسط	Ring

ادغام توپولوژی‌ها با پروتکل‌های ارتباطی مانند UART، I2C و غیره

پروتکل‌های ارتباطی محلی مانند UART، I2C، SPI، CAN برای اتصال سنسورها و ماژول‌ها به میکروکنترلرها مانند Arduino یا Raspberry Pi استفاده می‌شوند، در حالی که توپولوژی‌های شبکه برای ارتباط گسترده‌تر (wireless) یا (wired) به کار می‌روند. ادغام این دو لایه به صورت زیر است:

- **UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)** پروتکل سریال ناهم‌زمان، دوطرفه، برای ارتباط نقطه‌به‌نقطه. سرعت تا ۱۱۵۲۰۰ bps در IoT، برای اتصال سنسورها به gateway در توپولوژی Star یا Bus استفاده می‌شود. مثال: ادغام با ESP32 برای ارسال داده به cloud. ساده اما بدون آدرس‌دهی چنددستگاهی.
- **I2C (Inter-Integrated Circuit)** پروتکل سریال هم‌زمان، دوسیمه (SDA) و (SCL)، master-slave با آدرس‌دهی تا ۱۲۷ دستگاه. سرعت تا ۴۰۰ kbps (یا بالاتر در نسخه‌های جدید). مناسب برای ادغام در توپولوژی Mesh یا Tree، جایی که چندین سنسور به یک master متصل هستند. مثال: اتصال سنسورهای دما/رطوبت به میکروکنترلر در شبکه Zigbee.
- **SPI (Serial Peripheral Interface)** پروتکل سریال هم‌زمان، چهارسیمه، full-duplex با سرعت بالا تا چند Mbps. master-slave با انتخاب slave از طریق CS. در IoT، برای دستگاه‌های پرسرعت مانند نمایشگرها یا کارت‌های SD در توپولوژی Star استفاده می‌شود. مثال: ادغام با CAN برای شبکه‌های صنعتی.

- **CAN (Controller Area Network)** پروتکل سریال چند master، مقاوم در برابر نویز، برای شبکه‌های صنعتی. سرعت تا ۱ Mbps. اغلب با توپولوژی Bus ادغام می‌شود، مانند در خودروهای هوشمند یا کارخانه‌های IoT. مثال: اتصال سنسورها در یک خط Bus و سپس gateway به Mesh بی‌سیم.

- **سایر پروتکل‌ها** RS-485: برای فاصله‌های طولانی در توپولوژی Bus/Tree، یا Ethernet برای ادغام با Star/Mesh در مقیاس بزرگ. در IoT، این پروتکل‌ها لایه فیزیکی محلی را فراهم می‌کنند، در حالی که پروتکل‌های بالاتر مانند MQTT یا CoAP برای ارتباط شبکه‌ای استفاده می‌شوند.

نکته کلیدی ادغام: در یک سیستم IoT، پروتکل‌های سریال مانند UART/I2C برای "edge communication" (اتصال محلی سنسورها) استفاده می‌شوند، سپس داده‌ها به gateway منتقل شده و از طریق توپولوژی شبکه (مانند Mesh یا Zigbee) به cloud ارسال می‌شود. این ترکیب کارایی و مقیاس‌پذیری را افزایش می‌دهد، اما نیاز به مدیریت قدرت و امنیت دارد.

طرح مسئله پروژه VaN3Twin

۱. مقدمه

با گسترش فناوری خودروهای خودران و سیستم‌های حمل و نقل هوشمند شهری، نیاز به شبیه‌سازی دقیق و جامع شبکه‌های **V2X (Vehicle-to-Everything)** بیش از پیش احساس می‌شود. هدف پروژه **VaN3Twin**، توسعه یک شبیه‌ساز دیجیتال چندفناوری است که امکان بررسی و تحلیل تعامل خودروها با محیط شهری و زیرساخت‌های هوشمند را فراهم می‌کند.

این پروژه از مدل مفهومی و دیجیتال بهره می‌برد و با ادغام ردیابی پرتو (**Ray-Tracing**) در حلقه شبیه‌سازی، دقت بالاتری در شبیه‌سازی کانال‌های ارتباطی و سناریوهای واقعی ارائه می‌دهد.

۲. اهداف پروژه

- توسعه یک **Digital Twin** چندفناوری برای **V2X** با قابلیت شبیه‌سازی خودروهای خودران و شبکه‌های شهری هوشمند.
 - بررسی و بهینه‌سازی عملکرد ارتباطات خودرو-به-همه (**V2X**) با استفاده از مدل‌های ردیابی پرتو.
 - تحلیل تأثیر توپولوژی شبکه، موقعیت خودروها، **RSU**ها و ایستگاه‌های پایه بر کیفیت ارتباطات.
 - ایجاد پلتفرمی قابل توسعه برای آزمایش سناریوهای ترافیکی و حمل و نقل هوشمند.
-

۳. توپولوژی و اجزای شبکه

شبکه شبیه سازی شامل اجزای زیر است:

نقش در شبیه سازی	جز شبکه
عامل های متحرک با قابلیت خودران و ارتباط V2X	خودروها (Vehicles)
مسیرهای حرکت خودروها با مشخصات هندسی واقعی یا فرضی	جاده ها (Roads)
تأمین ارتباط سلولی و پشتیبانی از V2X	ایستگاه های پایه (Base Stations)
نقاط دسترسی محلی برای خودروها و بهینه سازی ترافیک	RSU (Road Side Units)
جمع آوری داده های محیطی، ترافیکی و وضعیت خودروها	سنسورها (Sensors)

۴. روندنما (Workflow)

- تعریف سناریو و محیط شهری: بارگذاری نقشه ها، جاده ها و موقعیت اولیه خودروها و RSU ها.
- مدلسازی خودروها و رفتار خودران: تعریف رفتار حرکت، مسیر یابی، و قوانین فیزیکی.
- شبیه سازی ارتباطات: V2X اجرای مدل های رادیویی و ردیابی پرتو برای ارزیابی کیفیت لینک ها.
- جمع آوری داده ها و تحلیل: بررسی پارامترهایی مثل تأخیر، نرخ خطا، throughput و تأثیر توپولوژی شبکه.
- بهینه سازی و تکرار: اصلاح مکان RSU ها، مسیر خودروها و پارامترهای شبکه برای بهبود عملکرد.

۵. مدت زمان پروژه

مدت زمان تقریبی	فاز پروژه
1 ماه	فاز ۱: تحلیل نیازمندی ها و طراحی مدل مفهومی
2 ماه	فاز ۲: توسعه مدل دیجیتال و پیاده سازی اولیه
2 ماه	فاز ۳: شبیه سازی و جمع آوری داده ها
1 ماه	فاز ۴: تحلیل نتایج و بهینه سازی
1 ماه	فاز ۵: مستندسازی و ارائه گزارش نهایی

مدت کل پروژه ۷ ماه

۶. خروجی ها و محصولات پروژه

- شبیه ساز Digital Twin V2X با قابلیت شبیه سازی خودروهای خودران و زیرساخت های هوشمند شهری.
- گزارش تحلیل کیفیت ارتباطات V2X و تأثیر توپولوژی شبکه.
- ابزار قابل توسعه برای سناریوهای مختلف حمل و نقل هوشمند.

نکات کلی:

همیشه تعادل بین سرعت و مصرف انرژی را در نظر بگیرید، زیرا IoT اغلب باتری محور است.

برای امنیت، پروتکل ها را با لایه های بالاتر مانند TLS ترکیب کنید.

تست (HIL (Hardware-in-the-Loop را برای اعتباربخشی استفاده کنید، همان طور که OPAL-RT پیشنهاد می کند.

ایده اولیه

در فاز ابتدایی پروژه **VaN3Twin** و بر اساس اصول مهندسی سیستم‌های مخابراتی و شبیه‌سازی شبکه‌های هوشمند، تلاش شد تا پیچیدگی‌های سیستم به حداقل برسد تا فهم و توسعه پروژه به صورت گام به گام و ساختاریافته تسهیل گردد. به همین منظور، به جای پیاده‌سازی کامل سخت‌افزار و سنسورهای واقعی، از یک **ماژول شبیه‌ساز دیجیتال مرکزی** به عنوان هاب کنترل و پردازش استفاده شد.

این هاب دیجیتال به دلیل قابلیت‌های گسترده‌ای مانند اجرای همزمان چند مدل ارتباطی **V2X**، پردازش سناریوهای ترافیکی پیچیده و امکان ادغام داده‌های محیطی، گزینه‌ای ایده‌آل برای مرکز کنترل سیستم شبیه‌سازی محسوب می‌شود. هاب دیجیتال به واسطه مدل‌های مفهومی خودروها و **RSU** ها، به صورت نرم‌افزاری با توپولوژی شبکه ارتباط برقرار می‌کند و امکان شبیه‌سازی دقیق **ارتباطات خودرو-به-همه (V2X)** را فراهم می‌آورد.

هر واحد شبکه شامل یک خودروی شبیه‌سازی شده، یک ایستگاه پایه یا **RSU** است که با هاب مرکزی تعامل داشته و رفتار واقعی سیستم‌های حمل و نقل هوشمند را مدل‌سازی می‌کند. در مرحله اولیه توسعه، سه سناریو اصلی شامل **حرکت خودرو در مسیرهای شهری**، **تبادل داده بین خودروها و اتصال با RSU ها** به منظور ارزیابی عملکرد شبکه انتخاب شدند.

نحوه عملکرد سیستم به این صورت است که هاب مرکزی با استفاده از **پروتکل‌های استاندارد شبکه و مدل‌های ردیابی پرتو (Ray-Tracing)**، کانال‌های ارتباطی را شبیه‌سازی کرده و موقعیت، سرعت و وضعیت خودروها را به صورت بلادرنگ پردازش می‌کند. این پردازش امکان برقراری ارتباط دوطرفه بین خودروها و زیرساخت‌ها را فراهم کرده و کیفیت لینک‌ها و رفتار شبکه را در سناریوهای مختلف ارزیابی می‌کند.

از منظر مهندسی مخابرات و شبکه‌های هوشمند، این سیستم یک **شبکه شبیه‌سازی شده مبتنی بر استانداردهای V2X و TCP/IP** است که در آن هاب مرکزی به عنوان یک گیت‌وی دیجیتال عمل کرده و دستورات کنترل شبکه و داده‌های ارتباطی را به مدل‌های مفهومی خودروها و **RSU** ها منتقل می‌کند. این ساختار، امکان توسعه آتی با اضافه کردن سناریوهای ترافیکی، خودروها و سنسورهای جدید را با حداقل تغییرات نرم‌افزاری فراهم می‌سازد.

دیاگرام اتصالات پروژه VaN3Twin

1. اجزای اصلی شبکه

نقش و عملکرد	جز شبکه
پردازش و مدیریت داده‌ها، شبیه‌سازی خودروها و RSU ها، اجرای الگوریتم‌های V2X و Ray-Tracing	Hub مرکزی شبیه‌ساز (Digital Twin Controller)
عامل‌های متحرک با قابلیت ارتباط V2V و V2I ، ارسال داده‌های موقعیت، سرعت و سنسورها	خودروهای شبیه‌سازی شده (Vehicle Nodes)
ارائه پوشش شبکه و ارتباط با هاب مرکزی	ایستگاه‌های پایه (Base Stations)
نقاط دسترسی محلی، تبادل داده با خودروها و ایستگاه‌ها، بهینه‌سازی مسیرها	RSU (Road Side Units)
جمع‌آوری داده‌های محیطی (ترافیک، شرایط جاده، آب و هوا) و ارسال به هاب	سنسورها (Sensors)
مشاهده و کنترل شبیه‌سازی از طریق وب یا نرم‌افزار مدیریتی	کاربر یا اپراتور (Operator Interface)

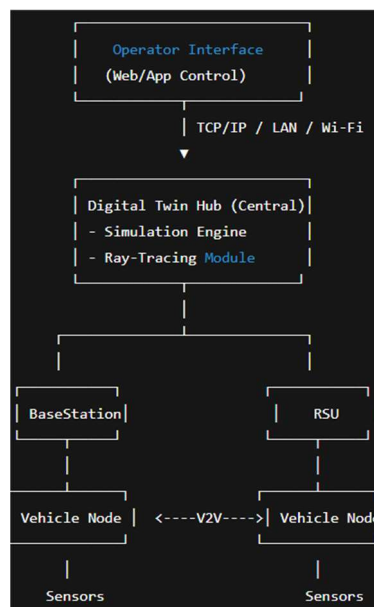
2. نوع ارتباطات

- V2V (Vehicle-to-Vehicle): خودروها به صورت peer-to-peer اطلاعات موقعیت، سرعت و هشدارها را رد و بدل می‌کنند.
- V2I (Vehicle-to-Infrastructure): خودروها با RSU ها و ایستگاه‌های پایه برای مدیریت ترافیک و مسیرها ارتباط برقرار می‌کنند.
- RSU I2Hub (Infrastructure-to-Hub): ایستگاه‌های پلویه داده‌ها راجه هاب مرکزی ارسال می‌کنند تا مدل شبیه‌سازی بروزرسانی شود.

- **User-to-Hub:** اپراتور با هاب مرکزی از طریق پروتکل TCP/IP و شبکه LAN یا Wi-Fi ارتباط برقرار می کند.

3. جریان داده و پردازش

۱. جمع آوری داده ها: سنسورها و خودروها اطلاعات محیطی و موقعیت را تولید می کنند.
۲. انتقال به RSU یا ایستگاه پایه: داده ها از طریق شبکه V2I به RSU منتقل می شوند.
۳. ارسال به هاب مرکزی RSU: داده ها را به هاب دیجیتال مرکزی منتقل می کنند.
۴. پردازش و شبیه سازی: هاب داده ها را پردازش کرده و الگوریتم های Ray-Tracing و کنترل ترافیک را اجرا می کند.
۵. خروجی به خودروها و کاربر: هاب نتایج شبیه سازی را برای خودروها ارسال می کند و وضعیت شبکه به اپراتور گزارش می شود.



□ خطوط مستقیم: جریان داده اصلی

□ خطوط دوطرفه: (V2V) تبادل داده بین خودروها

□ RSU ها و Base Station به هاب مرکزی متصل و داده ها را پردازش می کنند

لایه نرم افزاری و پیاده سازی

در بخش نرم افزاری، توسعه پروژه **VaN3Twin** با استفاده از پلتفرم های شبیه سازی دیجیتال و زبان های برنامه نویسی مناسب (مانند Python، ++C و MATLAB/Simulink) انجام شده است. هسته نرم افزار شامل مدل سازی خودروها، RSU ها و ایستگاه های پایه و همچنین پیاده سازی الگوریتم های ارتباطی **V2X** و **Ray-Tracing** است. این سیستم قابلیت تعامل دوطرفه بین خودروها و زیرساخت ها را شبیه سازی می کند و داده ها را به صورت بلادرنگ پردازش می نماید.

به طور مثال، سیگنال های موقعیت و وضعیت خودروها از مدل شبیه سازی به هاب مرکزی ارسال می شود و الگوریتم های کنترل و تحلیل شبکه، رفتار خودروها و کیفیت لینک ها را تعیین می کنند. همچنین، برای مانیتورینگ و جمع آوری داده های **real-time**، از پروتکل های استاندارد شبکه مانند **TCP/IP** و **MQTT** بهره گرفته شده است.

امنیت و ایمنی داده ها

- ارتباطات شبیه سازی شده از استانداردهای رمزنگاری (مانند TLS/SSL) استفاده می کنند تا داده های موقعیت و سنسورها محافظت شوند.
 - هاب مرکزی و RSU ها به صورت ایزوله عمل می کنند تا سیستم های واقعی خودروها در محیط آزمایش شبیه سازی شده دچار تداخل نشوند.
 - برای محافظت بیشتر، امکان افزودن سنسورهای مجازی اضافی و مدل های حفاظتی در سطح نرم افزاری وجود دارد.
-

چالش‌ها و محدودیت‌ها

- ناپایداری شبیه‌سازی در محیط‌های با تعداد خودرو و RSU زیاد (high-density) که نیاز به بهینه‌سازی الگوریتم دارد.
- مصرف منابع پردازشی بالا هنگام اجرای مدل‌های دقیق Ray-Tracing و شبیه‌سازی بلادرنگ.
- محدودیت در دقت مدل‌های سنسورها و پیش‌بینی رفتار واقعی کاربران.

مزایا و قابلیت توسعه

- **سادگی و انعطاف‌پذیری بالا**: امکان افزودن خودروها، RSUها، سناریوهای ترافیکی و سنسورهای مجازی جدید بدون تغییر ساختار اصلی.
- **قابلیت مقیاس‌پذیری**: می‌توان شبیه‌سازی را از چند خودرو و RSU به سطح یک شبکه شهری کامل گسترش داد.
- **امکان ادغام با سیستم‌های ابری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین**: برای تحلیل داده‌ها، پیش‌بینی رفتار خودروها و بهینه‌سازی مسیرها.
- **امکان توسعه به سمت اتوماسیون هوشمند شهری**، مانند تغییر چراغ‌های راهنمایی بر اساس تراکم ترافیک و کنترل هوشمند خودروها.

فازهای آتی توسعه

۱. **ادغام با پلتفرم‌های ابری** مانند AWS IoT یا Google Cloud برای مدیریت داده و کنترل از راه دور.
۲. **استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین** (مثلاً با TensorFlow Lite) برای پیش‌بینی رفتار خودروها و بهینه‌سازی ترافیک.

۳. گسترش مدل‌های سنسور و محیط شهری شامل ترافیک واقعی، شرایط آب و هوایی و مسیرهای متغیر.

۴. توسعه رابط کاربری حرفه‌ای برای اپراتور جهت مشاهده وضعیت شبکه، خودروها و تحلیل داده‌ها به صورت real-time.

- مقایسه MS-VAN3T و Ray Tracer در شبیه‌سازی V2X
- در شبیه‌سازی ارتباطات V2X، انتخاب روش مدل‌سازی کانال و لینک ترافیکی نقش حیاتی در دقت نتایج دارد.
- ۱) MS-VAN3T: شبیه‌ساز منبع‌باز مبتنی بر ns-3
- MS-VAN3T یک شبیه‌ساز منبع‌باز است که برای ارزیابی ارتباطات V2X طراحی شده و با SUMO ادغام می‌شود.
- مدل کانال: عمدتاً احتمالاتی (stochastic) و ساده، مبتنی بر استانداردهای ۳ GPP برای محاسبه LoS/NLoS، path loss و تداخل.
- مزیت: کاهش پیچیدگی محاسباتی و اجرای سریع شبیه‌سازی‌های بزرگ.
- محدودیت: در محیط‌های شهری پیچیده، مصنوعات آماری مانند توزیع دوقله‌ای SINR ایجاد می‌شود و دقت مدل کاهش می‌یابد.
- مدل لینک ترافیکی: دقیق و مبتنی بر داده‌های OpenStreetMap و SUMO، اما فاقد مدل‌سازی فیزیکی اثرات چندمسیره، بازتاب‌ها و داپلر پویا است.
- به طور خلاصه، MS-VAN3T برای شبیه‌سازی سریع و سناریوهای بزرگ مقیاس مناسب است، اما در سناریوهای NLoS یا محیط‌های پیچیده شهری، دقت محدود می‌باشد.
-
- ۲ Ray Tracer. در: Van3Twin شبیه‌سازی قطعی و واقع‌گرایانه

- در مقابل، **Ray Tracer** یک روش قطعی (deterministic) است که در VaN3Twin با ابزارهایی مانند **Sionna** پیاده‌سازی می‌شود.
- **مدل محیط:** محیط سه‌بعدی دقیق، شامل ساختمان‌ها، جاده‌ها و موانع شهری.
- **مسیر انتشار امواج:** محاسبه بازتاب، پراش، پراکندگی و اثرات داپلر برای هر مسیر.
- **پارامترهای کانال RSSI:** SINR و تأخیرهای چندمسیره به صورت واقع‌گرایانه محاسبه می‌شوند، و توزیع SINR طبیعی و بدون مصنوعات است.
- **مزیت:** دقت بسیار بالاتر در سناریوهای NLoS و کاهش خطاهای شبیه‌سازی به طور چشمگیر.
- **۳. ماژول Coexistence پیشرفته**
- VaN3Twin یک ماژول **coexistence** دارد که روی فرکانس‌های مختلف کار می‌کند و امکان استفاده همزمان از منابع فرکانسی را فراهم می‌سازد.
- تداخل بین فناوری‌های مختلف (802.11p و NR-V2X) با دقت بالا مدل‌سازی می‌شود.
- امکان ارزیابی واقعی نرخ دریافت بسته و خطاها فراهم است.

2-1 روش شبیه‌سازی (Simulation Methodology)

الف) هدف کلی شبیه‌سازی

در این پروژه، هدف ایجاد یک دوقلوی دیجیتال دقیق (Digital Twin) برای سیستم‌های ارتباط خودرویی V2X است. ادغام یک شبیه‌ساز شبکه معتبر مانند **ms-van3t** با یک **Ray Tracer** پیشرفته (مانند **Sionna RT**) امکان محاسبه دقیق پارامترهای کانال رادیویی را فراهم می‌کند.

این رویکرد باعث تولید شاخص‌های کلیدی عملکرد شامل:

- قدرت سیگنال دریافتی (RSSI)

- نسبت سیگنال به تداخل و نویز (SINR)

- نرخ دریافت بسته (PRR)

- نرخ تحویل داده (DR)

...با دقت بالا و پیش بینی نزدیک به رفتار واقعی سیستم می شود. چنین مدلسازی، شکاف بین شبیه سازی و عملکرد واقعی در محیط های شهری پیچیده و بزرگراهی را کاهش داده و ارزیابی پروتکل ها و الگوریتم های V2X را قابل اعتمادتر و کارآمدتر می سازد.

ب) اجزای اصلی شبیه سازی

1. مدل سازی محیط فیزیکی (Physical Environment Twin)

- استفاده از نقشه های واقعی OpenStreetMap و داده های ارتفاعی برای ایجاد محیط سه بعدی شامل ساختمان ها، علائم راهنمایی، درختان و اشیاء پویا/ثابت.
- خروجی مدل ها با فرمت OBJ/PLY یا از طریق افزونه های Blender-OSM برای سازگاری با Ray Tracer تولید می شود.
- تعریف مواد رادیویی (Concrete)، Asphalt، Glass، Vegetation و (Vehicles) با پارامترهای دی الکتریک (ϵ_r) و هدایت الکتریکی (σ).

2. موتور Mobility

- شبیه سازی حرکت خودروها با SUMO یا CARLA.
- خروجی شامل موقعیت سه بعدی (x, y, z)، سرعت، جهت حرکت و timestamp برای هر خودرو است.

3. شبیه ساز شبکه (ms-van3t)

- مبتنی بر ns-3 و شبیه سازی پروتکل های V2X (IEEE 802.11p ، V2X ، LTE-V2X ، NR-V2X) و لایه های بالاتر (MAC) ، (Application).
- ارسال بسته ها بر اساس پارامترهای کانال دریافت شده از Ray Tracer انجام می شود.
- 4. Ray Tracer آنلین (Sionna RT)
- محاسبه دقیق کلنال رادیویی برای جفت های فرستنده-گیرنده با در نظر گرفتن موقعیت لحظه ای خودروها.
- خروجی شامل LoS/NLoS ، gain مسیریهای چندگانه، تأخیرها، زوایای ورود/خروج (AoA/AoD)، اثر داپلر و الگوهای آنتن Tx/Rx.
- ادغام پویا با ms-van3t برای به روزرسانی لحظه ای کانال.
- 5. Coexistence و Interference
- مدیریت منابع فرکانسی مشترک و تداخل بین فناوری های مختلف (multi-RAT).
- محاسبه SINR بلوک-به بلوک و تصمیم گیری دریافت بسته بر اساس میانگین وزنی SINR و آستانه MCS.
- استفاده از کش برای کاهش محاسبات تکراری و به روزرسانی کش در صورت تغییرات موقعیت قابل توجه.

ج) جریان داده و پروتکل ارتباطی

- ارتباط بین ms-van3t و Ray Tracer از طریق پروتکل های سبک مانند UDP/JSON یا RPC برقرار می شود.
- جریان محاسبه کانال:
- ۱. ms-van3t موقعیت ها و blocker ها را ارسال می کند.

۲. Ray Tracer مسیره‌های LoS/NLoS، α_i ، τ_i و اثر داپلر را محاسبه می‌کند.

۳. gain مسیر کلی:

$$G_{lin} = \sum_i |\alpha_i|^2, G_{dB} = 10 \log_{10} G_{lin} \quad (1-1)$$

• توان دریافتی و SINR بلوک-به-بلوک:

$$P_{rx} = P_{tx} \times G_{lin}, N = k_B T B_{block}, SINR_z = \frac{P_{rx,desired,z}}{N_z + \sum P_{rx,interf,z}} \quad (1-2 - 1-4)$$

• تصمیم دریافت بسته: اگر میانگین وزنی $SINR \geq SINR_{req}$ (MCS)، بسته دریافت موفق است؛ در غیر این صورت از دست رفته محسوب می‌شود.

(د) معیارهای ارزیابی عملکرد

- RSSI: میانگین قدرت سیگنال دریافتی (dBm)
- PDF SINR: توزیع احتمالاتی SINR برای مقایسه با داده‌های واقعی
- PRR (Packet Reception Ratio): نسبت بسته‌های موفق بر اساس فاصله و شرایط کانال
- DR (Disagreement Ratio): درصد عدم تطابق شبیه‌سازی با واقعیت:

$$DR = \frac{1}{|S|} \sum_{i \in S} 1\{d_i(A) \neq d_i(B)\} \quad (1-6)$$

ه) نتایج کلیدی شبیه سازی

- **RSSI:** کاهش تدریجی و واقع گرایی با افزایش فاصله؛ منحنی VaN3Twin با داده های میدانی تطابق بالاتری دارد نسبت به ms-van3t که اغلب خوش بینانه است.
- **SINR:** توزیع VaN3Twin دقیق تر و با پراکندگی بیشتر، منعکس کننده اثرات محیطی، چندمسیره و انسداد مسیر.
- **PRR:** روند کاهش PRR با افزایش فاصله مشابه واقعیت و نزدیک تر به داده های میدانی.
- **DR: VaN3Twin** نرخ عدم تطابق ~ ۵,۶٪ (تقریباً نصف) ms-van3t (۱۲٪) دقت بالاتر در بازنمایی رفتار واقعی لینک های V2X.

این معماری مدولار، قابل گسترش و منبع باز، امکان شبیه سازی دقیق و واقع گرایانه همزیستی فناوری های V2X و کاهش شکاف بین شبیه سازی و عملکرد واقعی را فراهم می کند و ابزار قدرتمندی برای توسعه سیستم های حمل و نقل هوشمند به شمار می رود.

نتایج و مزیت VaN3Twin

- نرخ عدم تطابق (**Disagreement Ratio – DR**) در VaN3Twin به طور قابل توجهی کاهش یافته است.
- استفاده از **دوقلوی دیجیتال مبتنی بر Ray Tracing**، زمان توسعه و هزینه تحلیل پروتکل های V2X، ارزیابی الگوریتم های رله حمل و نقل و طراحی سیستم های میدانی خودروها را به شدت کاهش می دهد.
- در محیط های شهری پیچیده، دقت مدل کانال و لینک ترافیکی VaN3Twin، نزدیک به واقعیت بوده و شبیه سازی های معتبر و قابل اعتماد را تضمین می کند.

- در این پروژه، یک چارچوب شبیه‌سازی پیشرفته مبتنی بر **Ray-Tracing** برای ارزیابی دقیق سناریوهای ارتباطی **V2X** توسعه داده شده است. هدف اصلی، بررسی و مقایسه عملکرد دو شبیه‌ساز **ms-van3t** و **Van3Twin** در بازتولید شرایط واقعی محیط‌های ارتباطی خودروها بوده است. نتایج حاصل از مقایسه این دو چارچوب نشان می‌دهد که **ms-van3t** اگرچه از نظر ساختار شبیه‌سازی کارآمد است، اما در بازنمایی دقیق پدیده‌های پیچیده محیطی با محدودیت‌هایی مواجه می‌شود؛ به‌ویژه در سناریوهایی که تحت تأثیر چالش‌های محیطی نظیر انسداد مسیر، بازتاب‌های چندگانه، پویایی محیط، تراکم ترافیک و تغییرات شدید کانال رادیویی قرار دارند.
- در مقابل، شبیه‌ساز **Van3Twin** با بهره‌گیری از یک مدل‌سازی دقیق‌تر مبتنی بر **Ray-Tracing** و لحاظ کردن جزئیات واقعی محیط، توانسته است بازتولید واقع‌گرایانه‌تری از شرایط انتشار امواج ارائه دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شاخص‌هایی نظیر **RSSI** و **PRR** در **Van3Twin** تطابق بسیار بالاتری با داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی دارند، در حالی که اختلافات مشاهده‌شده در شاخص **SINR** نیز به‌طور محسوسی کاهش یافته است. این موضوع بیانگر دقت بالاتر **Van3Twin** در مدل‌سازی تداخل، نویز و پدیده‌های انتشار سیگنال در محیط‌های شهری و بزرگراهی است.
- یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، کاهش قابل توجه شاخص **Ratio Disagreement** در نتایج **Van3Twin** نسبت به **ms-van3t** است؛ به‌طوری‌که میزان عدم تطابق نتایج شبیه‌سازی با داده‌های واقعی تقریباً به نصف کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد که **Van3Twin** نه‌تنها از نظر کیفی، بلکه از منظر کمی نیز عملکرد برتری در شبیه‌سازی ارتباطات **V2X** دارد.
- به‌طور کلی، نتایج این پروژه تأیید می‌کند که استفاده از **Ray-Tracing** مبتنی بر داده‌های واقعی محیطی می‌تواند نقش کلیدی در افزایش دقت شبیه‌سازی‌های شبکه‌های خودرویی ایفا کند. این چارچوب امکان تحلیل دقیق عملکرد لینک‌های ارتباطی، ارزیابی سناریوهای پیچیده شهری، و بررسی اثر

عوامل محیطی و ترافیکی را به صورت قابل اعتماد فراهم می سازد.

- در راستای تحقق اهداف این پروژه، تمامی مراحل شبیه سازی با استفاده از مدل های به روز کانال تطبیقی و با تکیه بر داده های واقعی انجام شده است. سناریوهای مورد بررسی مستقیماً از خروجی شبیه سازی ترافیکی استخراج شده و بدون اعمال ساده سازی های غیرواقعی، وارد فرآیند شبیه سازی ارتباطی شده اند تا نتایج از نظر علمی و عملی دارای اعتبار باشند.

- تمامی پیاده سازی ها با استفاده از کدهای متن باز انجام شده و نتایج به صورت کامل مستند سازی شده اند، به گونه ای که فرآیند شبیه سازی، ارزیابی شاخص ها، تحلیل نتایج و استخراج خروجی ها به طور مستقل و قابل بازتولید قابل انجام است. همچنین، هیچ یک از داده ها یا نتایج این پروژه از منابع خارجی به صورت غیرمجاز اقتباس نشده و کلیه خروجی ها حاصل طراحی، شبیه سازی و تحلیل چارچوب های پیشنهادی در این پژوهش هستند.

در نهایت، این پروژه نشان دهنده پتانسیل بالای فناوری های نوین در حل مسائل روزمره مانند مدیریت منابع انرژی و محیطی است. با وجود چالش های مواجهه شده، دستاوردهای آن پایه ای برای توسعه های آتی فراهم می کند، مانند ادغام هوش مصنوعی برای پیش بینی رفتار کاربر یا گسترش به سیستم های بزرگ تر مانند شهرهای هوشمند. امیدواریم این کار، الهام بخش برای تحقیقات آینده در زمینه مهندسی مخابرات و کنترل باشد و به سمت ساختن جهانی پایدارتر کمک کند. از تمامی اساتید، همکاران و منابع حمایتی که در این مسیر همراه بودند، سپاسگزاریم.

- [١] Al-Ali, A. R., & Al-Rousan, M. (٢٠٠٥). Java-based home automation system. IEEE Transactions on Consumer Electronics, ٥٠(٢), ٢٩٨-٥٠٢.
- [٢] Arduino IDE Documentation. (٢٠٢٣). Retrieved from <https://www.arduino.cc/reference/en/>
- [٣] Espressif Systems. (٢٠٢٢). ESP٣٢ Technical Reference Manual. Espressif Systems.
- [٤] Gunge, V. S., & Yalagi, P. S. (٢٠١٦). Smart home automation: A literature review. International Journal of Computer Applications, ١٣٥(٦), ٦-١٠.
- [٥] Kumar, S. (٢٠١٤). Ubiquitous smart home system using android application. International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), ٦(١), ٣٣-٤٣.
- [٦] MQTT Protocol Specification. (٢٠٢٣). OASIS Standard. Retrieved from <https://mqtt.org/mqtt-specification/>
- [٧] Pan, J., Jain, R., Paul, S., Vu, T., Saifullah, A., & Sha, M. (٢٠١٥). An internet of things framework for smart energy in buildings: designs, prototype, and experiments. IEEE Internet of Things Journal, ٢(٦), ٥٢٧-٥٣٧.
- [٨] Piyare, R. (٢٠١٣). Internet of things: Ubiquitous home control and monitoring system using android based smart phone. International Journal of Internet of Things, ٢(١), ٥-١١.
- [٩] Shah, S. H., & Yaqoob, I. (٢٠١٦). A survey: Internet of Things (IOT) technologies, applications and challenges. ٢٠١٦ IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE), ٣٦٥-٣٧١.
- [١٠] Tan, L., & Wang, N. (٢٠١٠). Future internet: The internet of things. ٢٠١٠ ٣rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), ٥, ٧٥-٣٧٦-٧٥-٣٨٠.

- [١١] Wang, M., Zhang, G., Zhang, C., Zhang, J., & Li, C. (٢٠١٣). An IoT-based appliance control system for smart homes. ٢٠١٣ Fourth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), ٧٤٤-٧٤٧.
- [١٢] IoT-Based Building Management Systems (IoT-BMS). (٢٠٢٤). IOP Science. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1396/1/012020/pdf>
- [١٣] An IoT-Based Smart Building Solution for Indoor Environment Management. (٢٠٢١). MDPI. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/10/2959>
- [١٤] A Smart Energy Management System for Residential Buildings using IOT-based back propagation with ANN. (٢٠٢٣). E3S Web of Conferences. Retrieved from https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/24/e3sconf_icseret2023_04009.pdf
- [١٥] IoT—A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings. (٢٠٢٤). MDPI. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/11/3446>
- [16] F. Raviglione, C. R. Carletti, M. Malinverno, C. Casetti, and C. Chiasserini, “ms-van3t: An integrated multi-stack framework for virtual validation of V2X communication and services,” *Computer Communications*, vol. 217, pp. 70–86, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366424000227>
- [17] P. A. Lopez, M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y.-P. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner, and E. Wießner, “Microscopic traffic simulation using SUMO,” in *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 2018. [Online]. Available: <https://elib.dlr.de/124092/>
- [18] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, and V. Koltun, “CARLA: An open urban driving simulator,” in *Conference on Robot Learning*, PMLR, 2017, pp. 1–16.
- [19] “TraCI,” <https://sumo.dlr.de/docs/TraCI.html>
- [20] OpenStreetMap contributors, “Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>,” <https://www.openstreetmap.org>, 2017.
- [21] Google Maps Data, ©2025 Airbus, Maxar Technologies. [Online]. Available: <https://www.google.com/maps>
- [22] PC Engines, “APU2E4 System board schema.” [Online]. Available: <https://www.pceingines.ch/apu2e4.htm>
- [23] ArduSimple, “simpleRTK2B Fusion description and specifications.” [Online]. Available: <https://www.ardusimple.com/product/simplertk2b-fusion/>

- [24] F. Raviglione, M. Malinverno, and C. Casetti, "Open source platform for IEEE 802.11p NICs evaluation," in *2019 IEEE 20th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, IEEE, 2019, pp. 1–3.
- [25] MobileMark, "MGW-313 description and specifications." [Online]. Available: <https://www.mobilemark.com/product/smwg-313-2xdsr-gns/>
- [26] "3GPP TR 36.885: Study on LTE-based V2X Services," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report 36.885, 2016, version 14.0.0. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org>
- [27] "3GPP TR 38.901: Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report 38.901, 2017, version 14.0.0. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org>
- [28] M. Drago, T. Zugno, M. Polese, M. Giordani, and M. Zorzi, "MilliCar: An ns-3 module for mmWave NR V2X networks," in *Proceedings of the 2020 Workshop on ns-3*, 2020, pp. 9–16.
- [29] L. Cazzella, F. Linsalata, M. Magarini, M. Matteucci, and U. Spagnolini, "A multi-modal simulation framework to enable digital twin-based V2X communications in dynamic environments," in *2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall)*, 2024, pp. 1–6.
- [30] V. Vukadinovic, K. Bakowski, P. Marsch, I. D. Garcia, H. Xu, M. Sybis, P. Sroka, K. Wesolowski, D. Lister, and I. Thibault, "3GPP C-V2X and IEEE 802.11p for vehicle-to-vehicle communications in highway platooning scenarios," *Ad Hoc Networks*, vol. 74, pp. 17–29, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157087051830057X>
- [31] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, and M. Sepulcre, "Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation With Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121526–121548, 2020.
- [32] E. Moradi-Pari, D. Tian, M. Bahramgiri, S. Rajab, and S. Bai, "DSRC versus LTE-V2X: Empirical performance analysis of direct vehicular communication technologies," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 5, pp. 4889–4903, 2023.