

Latenz- und Energievergleich drahtloser Protokolle für haptische VR-Systeme

Arne Kohlhaupt¹, Ulrike Steinmann¹

¹ IFAT, Universitätspl. 2, 39106 Magdeburg, Germany

Zusammenfassung

Haptisches Feedback in Virtual-Reality-Systemen erfordert eine geringe Übertragungslatenz, um eine hohe Immersivität zu gewährleisten und Cybersickness zu vermeiden. Je geringer die Übertragungslatenz, desto größer ist die verfügbare Zeitreserve für die Ansteuerung haptischer Aktuatoren und den Einsatz komplexerer Feedbacksysteme. Die Übertragungslatenz bildet dabei einen entscheidenden Teil der Gesamtsystemlatenz, da die entsprechende Steuernachricht vollständig übertragen worden sein muss, bevor ein Aktuator ausgelöst werden kann. In der vorliegenden Arbeit werden die drahtlosen Kommunikationsprotokolle ESP-NOW, WLAN-UDP und Bluetooth Low Energy 5.3 hinsichtlich ihrer Round-Trip-Zeit sowie ihres Stromverbrauchs auf dem Mikrocontroller ESP32-C6 messtechnisch verglichen. Der ESP32-C6 wurde als Hardwareplattform gewählt, da er alle drei Protokolle nativ unterstützt und damit einen direkten Vergleich unter identischen Hardwarebedingungen ermöglicht. Je Protokoll wurden 1000 Messungen mit einer Sendepause von 100 ms durchgeführt. Der Stromverlauf wurde auf der Client-Seite mit dem Power Profiler Kit 2 von Nordic Semiconductor bei einer Versorgungsspannung von 3,3 V aufgezeichnet. ESP-NOW erzielte mit einer mittleren Round-Trip-Zeit von 2,626 ms und einer Standardabweichung von 0,607 ms die geringste und reproduzierbarste Latenz. WLAN-UDP erreichte einen ähnlichen Mittelwert von 3,941 ms, wies jedoch mit einer Standardabweichung von 2,443 ms und einem 95. Perzentil von 9,311 ms eine für Echtzeitsysteme problematische Streuung auf. Bluetooth Low Energy 5.3 zeigte mit 13,007 ms die höchste Latenz, überzeugte jedoch durch die geringste Streuung aller Protokolle sowie einen um rund 41 Prozent reduzierten mittleren Stromverbrauch von 50,430 mA gegenüber ESP-NOW mit 85,100 mA und WLAN-UDP mit 84,145 mA. Alle drei Protokolle unterschreiten die für haptisches Feedback kritische Wahrnehmungsschwelle von 20 ms als One-Way-Latenz deutlich, womit die grundlegende Eignung aller Protokolle für den betrachteten Anwendungsfall bestätigt wird.

Keywords: Haptisches Feedback, Übertragungslatenz, ESP32-C6, drahtlose Kommunikation, Virtual Reality

Einleitung und Motivation

Haptisches Feedback in Virtual-Reality-Systemen stellt hohe Anforderungen an die Übertragungslatenz drahtloser Kommunikationsprotokolle. Je geringer die Übertragungslatenz, desto größer ist die verfügbare Zeitreserve für die Ansteuerung haptischer Aktuatoren. Dies ermöglicht den Einsatz komplexerer Feedbacksysteme und erweitert das Spektrum nutzbarer haptischer Technologien. Eine hohe Übertragungslatenz führt hingegen zu einer verminderten Immersivität und kann Cybersickness begünstigen. Bevor ein haptischer Aktuator ausgelöst werden kann, muss die entsprechende Steuernachricht vollständig übertragen worden sein. Die Übertragungslatenz bildet damit einen entscheidenden Teil der Gesamtsystemlatenz.

Im Rahmen des VRHap-Projekts wird ein eigenes Aktuatoriksystem auf Basis des ESP32-C6 entwickelt, das Anwendungen in Training, Therapie und Diagnostik adressiert. Für den Aufbau eines Host-Client-Systems mit bis zu zehn gleichzeitigen Clients ist die Kenntnis der protokollspezifischen Latenzen und des Energieverbrauchs eine wesentliche Voraussetzung für die Systemauslegung, da es sich um eine mobile, akkubetriebene Anwendung handelt. In der vorliegenden Arbeit werden daher die Protokolle ESP-NOW, WLAN-UDP und BLE 5.3 hinsichtlich ihrer Round-Trip-Time (RTT) sowie ihres Energieverbrauchs auf dem ESP32-C6 messtechnisch verglichen.

Technische Grundlagen

Die Latenz eines Netzwerks beschreibt die Zeit, die eine Nachricht vom Sender zum Empfänger benötigt, und setzt sich aus Ausbreitungs-, Übertragungs- und Wartezeit zusammen [1]. Bei kleinen Nachrichten dominieren die protokollspezifischen Verzögerungsanteile, da die Übertragungsverzögerung vernachlässigbar klein wird [1]. Da die Übertragungsstanz zwischen Host- und Client-ESP32 typischerweise unter einem Meter beträgt, ist die Ausbreitungsverzögerung elektromagnetischer Wellen vernachlässigbar klein gegenüber den protokollspezifischen Verzögerungsanteilen [1]. Hohe Latenz in VR-Systemen kann Cybersickness begünstigen [2], während für haptisches Feedback Wahrnehmungsschwellen von 20 bis 200 ms beschrieben werden [3].

Als Hardwareplattform wurde der ESP32-C6 gewählt, da er WiFi 6, BLE 5.3 und ESP-NOW nativ unterstützt und damit einen direkten Protokollvergleich unter identischen Hardwarebedingungen ermöglicht [4]. ESP-NOW ist ein von Espressif entwickeltes verbindungsloses Protokoll, das Anwendungsdaten direkt in herstellerspezifischen Action Frames des IEEE-802.11-Standards überträgt, ohne dass ein Verbindungsaufbau oder ein Access Point erforderlich ist [5]. Die Standardbitrate beträgt 1 Mbps bei einer maximalen Nutzlast von 250 Bytes pro Paket [5].

WLAN-UDP nutzt das verbindungslose User Datagram Protocol über einen IEEE-802.11-Access-Point. Durch den Verzicht auf Verbindungsaufbau und Bestätigungsmechanismen ist UDP gegenüber TCP latenzärmer [1]. Gemäß IEEE-802.11-Standard sendet ein Access Point kontinuierlich Beacon Frames in einem Standardintervall von 102,4 ms [6], was einen erhöhten Grundenergieverbrauch auch ohne aktive Datenübertragung verursacht.

BLE 5.3 kommuniziert in festen Verbindungsintervallen, in denen Sender und Empfänger Daten austauschen und anschließend in einen inaktiven Zustand wechseln können [7]. Dieses Prinzip reduziert den Energieverbrauch erheblich, begrenzt jedoch die minimale erreichbare Latenz strukturell nach unten, da Nachrichten erst im nächsten Verbindungsintervall übertragen werden können.

Methodik und Versuchsaufbau

Für die RTT-Messung wurden zwei ESP32-C6 Dev-Boards eingesetzt: ein Host-Board (H) und ein Client-Board (C), wie in Abbildung 1 dargestellt.

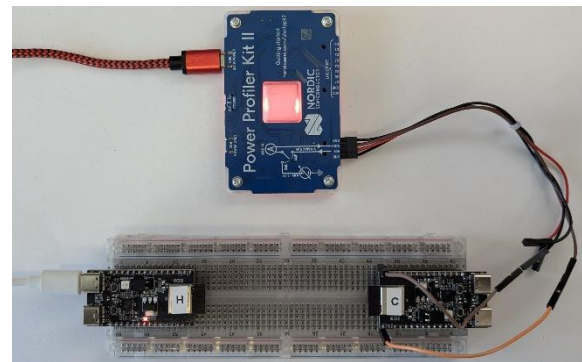


Abb. 1: Versuchsaufbau mit ESP32-C6 Host (H), ESP32-C6 Client (C) und Power Profiler Kit 2 (Nordic Semiconductor)

Der Host sendet eine 18-Byte-Nachricht („255255255255255255“), die einem realistischen Motorbefehl für das haptische Feedbacksystem entspricht. Die Nachricht ermöglicht die individuelle Ansteuerung von sechs unabhängigen Aktuatoren und wird vom Client als Echo zurückgesendet, woraus der Host die RTT berechnet. Je Protokoll wurden 1000 Messungen mit einer Sendepause von 100 ms zwischen den Messungen durchgeführt. Die Strommessung erfolgte auf der Client-Seite mit dem Power Profiler Kit 2 (Nordic Semiconductor) bei einer eingestellten Versorgungsspannung von 3,3 VDC. Zur Auswertung wurde jeweils ein stabiles Messfenster nach dem Einlaufen der Verbindung gewählt, um Ein- und Auslaufeffekte auszuschließen.

Round-Trip-Time

Für den Vergleich der Übertragungsprotokolle wurden je 1000 RTT-Messungen mit einer Sendepause von 100 ms zwischen den Messungen aufgezeichnet.

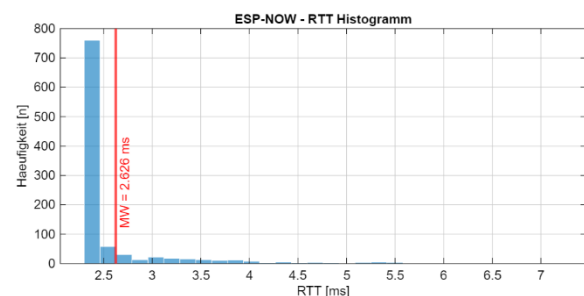


Abb. 2: RTT von ESP-NOW (n=1000)

Abbildung 2 zeigt exemplarisch die RTT-Verteilung von ESP-NOW. Die Verteilung weist ein stabiles Grundniveau bei ~2,39 ms auf, mit einer rechtsschiefen Charakteristik durch sporadisch auftretende erhöhte Latenzwerte. Dieser Verlauf ist charakteristisch für verbindungslose Protokolle, bei denen gelegentliche Kanalzugriffskonflikte zu erhöhten Latenzwerten führen. Mit einem Mittelwert von 2,626 ms, einer Standardabweichung von 0,607 ms und einem 95. Perzentil von 3,866 ms zeigt ESP-NOW eine für Echtzeitsysteme gut geeignete Latenzcharakteristik.

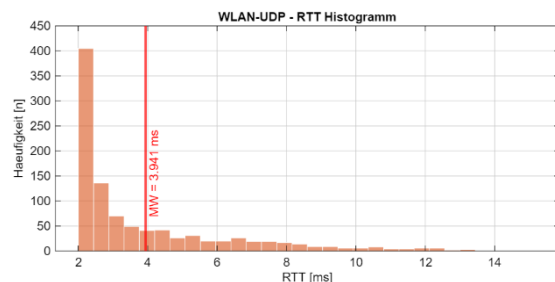


Abb. 3: RTT von WLAN-UDP (n=1000)

Abbildung 3 zeigt die RTT-Verteilung von WLAN-UDP. Im direkten Vergleich zu ESP-NOW ist die deutlich ausgeprägtere Streuung erkennbar: Während ESP-NOW den Großteil der Messungen in einem engen Bereich um ~2,39 ms konzentriert, erstreckt sich die WLAN-UDP-Verteilung mit einem langen Schwanz bis über 15 ms. Dies spiegelt sich in der Standardabweichung von 2,443 ms wider, die mehr als viermal so hoch ist wie bei ESP-NOW (0,607 ms). Das 95. Perzentil liegt bei 9,311 ms, was bedeutet, dass 5 % aller Pakete eine Latenz von über 9 ms aufweisen. Diese Variabilität ist auf die Zugriffssteuerung des vollständigen IEEE-802.11-Stacks zurückzuführen, bei dem konkurrierende Prozesse wie Beacon-Frame-Verwaltung zu unvorhersehbaren Verzögerungsspitzen führen können.

Abbildung 4 stellt die mittlere RTT aller drei Protokolle gegenüber.

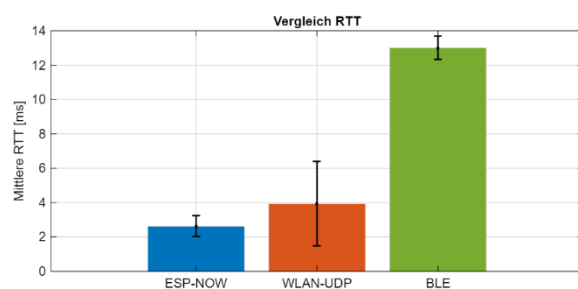


Abb. 4: Vergleich RTT alle drei Protokolle

ESP-NOW erzielt mit 2,626 ms den geringsten Mittelwert, gefolgt von WLAN-UDP mit 3,941 ms. BLE 5.3 weist mit 13,007 ms die höchste Latenz auf, zeigt jedoch mit einer Standardabweichung von 0,663 ms die geringste Streuung aller Protokolle. WLAN-UDP hingegen weist trotz ähnlichem Mittelwert wie ESP-NOW eine deutlich höhere Standardabweichung von 2,443 ms und ein 95. Perzentil von 9,311 ms auf, was für Echtzeitsysteme problematisch sein kann.

Tab. 1: Statistische Kenngrößen der RTT-Messungen (n = 1000)

Kenngröße	ESP-NOW [ms]	WLAN-UDP [ms]	BLE 5.3 [ms]
Mittelwert	2,626	3,941	13,007
Standardabweichung	0,607	2,443	0,663
Median	2,398	2,667	12,845
Modalwert	2,390	2,170	12,370
Minimum	2,385	2,117	12,310
Maximum	7,195	15,113	15,843
95. Perzentil	3,866	9,311	14,944
99. Perzentil	5,460	12,521	15,749

Tabelle 1 fasst alle statistischen Kenngrößen der RTT-Messungen zusammen. Alle drei Protokolle unterschreiten als One-Way-Latenz (RTT/2) die für haptisches Feedback kritische Wahrnehmungsschwelle von 20 ms deutlich.

Energieverbrauch

Der Energieverbrauch wurde auf der Client-Seite des ESP32-C6 mit dem Power Profiler Kit 2 bei einer Versorgungsspannung von 3,3 V aufgezeichnet. Zur Auswertung wurde jeweils ein stabiles Messfenster nach dem Einlaufen der Verbindung gewählt: 98 s für ESP-NOW, 101 s für WLAN-UDP und 112 s für BLE 5.3.

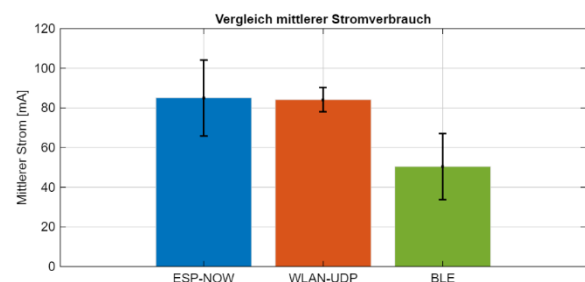


Abb. 5: Vergleich mittlerer Stromverbrauch

Abbildung 5 stellt den mittleren Stromverbrauch aller drei Protokolle gegenüber. ESP-NOW und WLAN-UDP weisen mit 85,100 mA bzw. 84,145 mA nahezu identische Werte auf. BLE 5.3 zeigt mit 50,430 mA einen um rund 41 % reduzierten Stromverbrauch gegenüber den beiden WLAN-basierten Protokollen. Bemerkenswert ist die deutlich geringere Standardabweichung von WLAN-UDP (6,108 mA) gegenüber ESP-NOW (19,155 mA), da der ESP32 im softAP-Modus durch den kontinuierlichen Beacon-Frame-Betrieb keinen ausgeprägten Ruhezustand zwischen den Paketen erreicht. Die erhöhte Standardabweichung bei BLE 5.3 (16,795 mA) ist auf die periodischen Aktivitätspulse im Verbindungsintervall zurückzuführen.

Tab. 2: *Kenngößen des Energieverbrauchs (Client-Seite, 3,3 V)*

<i>Kenngöße</i>	<i>ESP-NOW</i>	<i>WLAN-UDP</i>	<i>BLE 5.3</i>
<i>Mittlerer Strom</i>	85,1 mA	84,145 mA	50,430 mA
<i>Mittlere Leistung</i>	280,8 mW	277,7 mW	166,4 mW
<i>Energie pro Paket</i>	28,848 µJ	28,883 µJ	18,808 µJ
<i>Ladung pro Paket</i>	2428,3 µAh	2431,3 µAh	1583,2 µAh
<i>Ladung gesamt</i>	2,317 mAh	2,361 mAh	1,569 mAh

Tabelle 2 fasst alle Kenngößen des Energieverbrauchs zusammen. Für akkubetriebene mobile Anwendungen stellt der deutlich geringere Stromverbrauch von BLE 5.3 einen relevanten Vorteil dar, sofern die höhere Latenz von ~13 ms im jeweiligen Anwendungsfall tolerierbar ist.

Diskussion

ESP-NOW erzielt mit einem RTT-Mittelwert von 2,626 ms die geringste Übertragungsverzögerung und ist damit für latenzkritische Anwendungen am besten geeignet. Die Standardabweichung von 0,607 ms ist gering, jedoch treten vereinzelt Ausreißer bis 7,195 ms auf. WLAN-UDP weist mit einem Mittelwert von 3,941 ms eine ähnliche Grundlatenz auf, jedoch ist die Streuung mit einer Standardabweichung von 2,443 ms und einem 95. Perzentil von 9,311 ms für Echtzeitsysteme problematisch. BLE 5.3 zeigt mit 13,007 ms den höchsten Mittelwert,

gleichzeitig aber die geringste Streuung aller drei Protokolle.

Für das haptische VR-System ist nicht nur der Mittelwert entscheidend, sondern auch die Vorhersagbarkeit der Latenz. Unerwartete Verzögerungsspitzen können das haptische Feedback inkonsistent machen und die Immersion beeinträchtigen. Unter diesem Gesichtspunkt zeigt ESP-NOW das beste Gesamtbild aus niedrigem Mittelwert und vertretbarer Streuung.

Beim Energieverbrauch ergibt sich ein klares Bild: BLE 5.3 verbraucht mit 50,430 mA mittlerem Strom rund 41 % weniger als ESP-NOW (85,100 mA) und WLAN-UDP (84,145 mA), die nahezu identische Werte aufweisen. Bemerkenswert ist die nahezu identische Energieaufnahme von ESP-NOW und WLAN-UDP trotz des deutlich komplexeren IEEE-802.11-Stacks bei WLAN-UDP. Der kontinuierliche Beacon-Frame-Betrieb im softAP-Modus gleicht den potenziellen Energievorteil durch seltenere Nutzdatenübertragungen aus.

Alle drei Protokolle unterschreiten als One-Way-Latenz (RTT/2) die für haptisches Feedback als kritisch geltende Wahrnehmungsschwelle von 20 ms deutlich. Für den geplanten Einsatz im VRHap-System empfiehlt sich ESP-NOW als primäres Protokoll, da es die geringste Latenz bei vertretbarer Streuung bietet. Für Szenarien mit strikten Energiebeschränkungen stellt BLE 5.3 eine valide Alternative dar, sofern die höhere Latenz von ~13 ms toleriert werden kann. WLAN-UDP bietet gegenüber den beiden anderen Protokollen weder einen Latenz- noch einen Energievorteil.

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die Kommunikationsprotokolle ESP-NOW, WLAN-UDP und BLE 5.3 hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in latenzoptimierten haptischen VR-Systemen messtechnisch untersucht und verglichen. Als Hardwareplattform wurde der ESP32-C6 von Espressif Systems gewählt, da er alle drei Protokolle nativ unterstützt und damit einen direkten Vergleich unter identischen Hardwarebedingungen ermöglicht. Die Bewertung erfolgte anhand zweier zentraler Kriterien: der Round-Trip-Zeit als Maß für die Übertragungslatenz sowie dem mittleren Stromverbrauch als Maß für die Energieeffizienz im mobilen Betrieb.

Die RTT-Messungen zeigen, dass ESP-NOW mit einem Mittelwert von 2,626 ms und einer Standardabweichung von 0,607 ms die

geringste und zugleich gut reproduzierbare Latenz erzielt. WLAN-UDP erreicht zwar einen ähnlichen Modalwert, weist jedoch mit einer Standardabweichung von 2,443 ms und einem 95. Perzentil von 9,311 ms eine für Echtzeitsysteme problematische Streuung auf. BLE 5.3 zeigt mit 13,007 ms die höchste mittlere Latenz, zeichnet sich jedoch durch die geringste Streuung aller Protokolle aus, da das feste Verbindungsintervall sowohl die minimale als auch die maximale Übertragungszeit begrenzt. Hinsichtlich des Energieverbrauchs zeigt BLE 5.3 mit einem mittleren Stromverbrauch von 50,430 mA einen um rund 41 % reduzierten Verbrauch gegenüber ESP-NOW (85,100 mA) und WLAN-UDP (84,145 mA), die nahezu identische Werte aufweisen. Alle drei Protokolle unterschreiten die für haptisches Feedback kritische One-Way-Latenz von 20 ms deutlich, womit die grundlegende Eignung aller Protokolle für den betrachteten Anwendungsfall bestätigt wird. Für das VRHap-System empfiehlt sich ESP-NOW als primäres Protokoll für die drahtlose Kommunikation zwischen Host und Client, da es die beste Kombination aus geringer Latenz, niedrigem Jitter und einfacher Implementierung bietet. WLAN-UDP bietet gegenüber den beiden anderen Protokollen weder einen Latenz- noch einen Energievorteil und eignet sich vor allem dann, wenn eine direkte Integration in bestehende WLAN-Infrastrukturen erforderlich ist oder größere Datenmengen übertragen werden sollen. BLE 5.3 stellt aufgrund seines deutlich geringeren Stromverbrauchs eine energieeffiziente Alternative für akkubetriebene Anwendungen dar, sofern die höhere und durch das Verbindungsintervall bedingte Latenz von ~13 ms im jeweiligen Anwendungsfall tolerierbar ist. Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich auf eine Point-to-Point-Verbindung zwischen einem Host- und einem Client-ESP32. In einem nächsten Schritt soll die End-to-End-Latenz zwischen der Meta Quest 3 und dem ESP32-Host über UDP gemessen werden, um die Gesamtverzögerung des VRHap-Systems vom Rendering-Zeitpunkt bis zur haptischen Ausgabe vollständig zu charakterisieren. Erste Vorversuche deuten auf eine One-Way-Latenz von ~14,7 ms für diesen Pfad hin, sodass die Gesamtlatenz Quest 3 → Host → Client bei Verwendung von ESP-NOW auf der letzten Meile mit ~16 ms unterhalb der für haptisches Feedback kritischen Wahrnehmungsschwelle von 20 ms verbleibt. Darüber hinaus soll die Skalierbarkeit der Protokolle auf mehrere gleichzeitige Clients evaluiert werden, da im realen Betrieb beide Hände unabhängig voneinander mit haptischem Feedback versorgt

werden müssen. ESP-NOW bietet hier durch seine Mesh-Netzwerk-Fähigkeit und die Unterstützung von bis zu 20 Peer-Geräten [8] besondere Vorteile und ermöglicht den Aufbau komplexerer Aktuatoriksysteme ohne zentrale WLAN-Infrastruktur. Abschließend ist die Entwicklung eines vollständigen haptischen Aktuatoriksystems auf Basis des ESP32-C6 geplant, das die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse direkt umsetzt und eine vollständige Integration mit der Meta Quest 3 für Anwendungen in Training, Therapie und Diagnostik ermöglicht.

References

- [1] C. Baun, *Computernetze kompakt*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg; 2022.
- [2] J.-P. Stauffert, F. Niebling, M. E. Latoschik, Latency and Cybersickness: Impact, Causes, and Measures. A Review, *Frontiers in Virtual Reality* 1, 582204 (2020); doi: 10.3389/frvir.2020.582204.
- [3] H. Alsuradi, M. Eid, An ensemble deep learning approach to evaluate haptic delay from a single trial EEG data, *Frontiers in Robotics and AI* 9, 1013043 (2022); doi: 10.3389/frobt.2022.1013043.
- [4] esp32-c6_datasheet_en, https://documentation.espressif.com/esp32-c6_datasheet_en.pdf. Accessed May 18, 2026.
- [5] ESP-NOW - ESP32 - — ESP-IDF Programming Guide latest documentation, https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_now.html. Accessed May 18, 2026.
- [6] IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [7] P. Bulić, G. Kojek, A. Biasizzo, Data Transmission Efficiency in Bluetooth Low Energy Versions, *Sensors (Basel, Switzerland)* 19 (2019); doi: 10.3390/s19173746.

- [8] J. A. Cujilema Paguay, G. A. Hidalgo Brito, D. L. Hernandez Rojas, J. J. Cartuche Calva, Secure home automation system based on ESP-NOW mesh network, MQTT and Home Assistant platform, *IEEE Latin America Transactions* 21, 829–838 (2023); doi: 10.1109/TLA.2023.10244182.