

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Contesto e limiti delle onde elettromagnetiche	2
1.2	Motivazione dell'approccio acustico	3
1.3	Richiami teorici sulla propagazione acustica	3
1.4	Motivazioni sperimentali e obiettivi della tesi	4
1.5	Contributi attesi	4
2	Stato dell'Arte	5
2.1	Tecnologie IoT	5
2.2	Comunicazione in ambienti sotterranei	5
2.2.1	Radio frequenze	6
2.2.2	Onde acustiche	7
2.3	Applicazione della letteratura alla tesi	8
3	Design del Protocollo	9
3.1	Architettura generale del sistema	9
3.2	Livello Fisico	9
3.2.1	Ingresso	10
3.2.2	Filtraggio	11

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Contesto e limiti delle onde elettromagnetiche

Le reti di sensori in ambienti sotterranei pongono sfide peculiari alla comunicazione wireless. La propagazione delle *onde elettromagnetiche* nel sottosuolo soffre di attenuazioni elevate dovute alla permittività, alla conducibilità del terreno e all'umidità, con conseguente riduzione drastica della portata e dell'affidabilità dei link radio [1].

Alcune soluzioni proposte in letteratura includono l'uso di frequenze super-high ed ultra-high (SHF, UHF) con l'obiettivo di implementare sistemi di tracking e monitoraggio in miniere di carbone, gallerie o condotti [2]. Tuttavia, queste frequenze a causa della loro natura fisica sono soggette a forti perdite di segnale e riflessioni multipath, limitando la copertura a range dai 10 ai 33 metri in condizioni ottimali con l'ausilio di antenne direzionali con un'altezza pari a 1.2 metri l'una; questa tecnologia inoltre mostra tutta la sua vulnerabilità in presenza di curve strette (90°) o ostacoli.

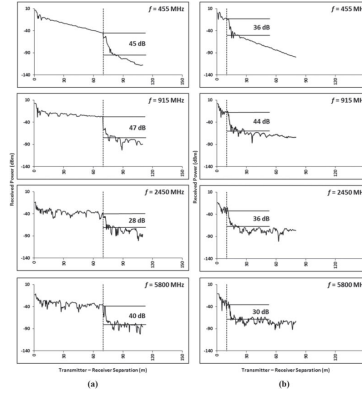


Figura 1.1: Corner Loss ~ 30 dB in un condotto con angolo di 90° per radio frequenze HF/SHF [2].

1.2 Motivazione dell'approccio acustico

Da questa problematica nasce la presente tesi, che si pone l'obiettivo di progettare e validare un **protocollo di comunicazione acustica** per reti **master-slave** in ambienti sotterranei, che dovrà essere: **efficiente, robusta ed economica**.

L'idea è sfruttare la *propagazione del suono nell'aria* presente in cavità, condotti o tunnel, trattando l'aria come un canale guida all'interno degli spazi confinati, e più in generale impiegare l'onda acustica come mezzo portante laddove il canale elettromagnetico è troppo penalizzato.

1.3 Richiami teorici sulla propagazione acustica

In effetti, l'aria può essere modellata come un fluido compressibile: le variazioni locali di pressione e densità generate da una sorgente si propagano come onde longitudinali, la cui dinamica è descritta dall'equazione delle onde acustiche. La velocità di propagazione, che in condizioni standard è circa 343 m/s, dipende da temperatura, pressione e composizione del gas, secondo la relazione $c = \sqrt{\gamma p_0 / \rho_0}$.

Questa visione permette di trattare l'aria non solo come "spazio vuoto", ma come un vero e proprio *canale fisico*, caratterizzato da attenuazioni dovute a dispersione geometrica, assorbimento atmosferico e riverberi dovuti alle superfici [3–5].

Il fine ultimo della rete sarà quello di permettere lo scambio di dati tra nodi utilizzando frequenze sonore sub-9kHz, appartenenti al range 1-10kHz: queste frequenze sono scelte per il loro compromesso tra portata e qualità del segnale [6]. L'applicazione principale è destinata al monitoraggio post-disastro, considerando

che in altri contesti l'utilizzo di segnali acustici potrebbe risultare disturbante. I sensori saranno, inoltre, in grado di rilevare la presenza di corpi umani o gas tossici a seguito di crolli o esplosioni, e trasmettere queste informazioni a un nodo master situato in superficie o in una zona sicura.

1.4 Motivazioni sperimentali e obiettivi della tesi

La letteratura recente indica che, in scenari confinati, segnali acustici a bassa frequenza possono mantenere un rapporto segnale/rumore utilizzabile su distanze dell'ordine delle decine di metri, con modalità di propagazione *lungo condotti* (ad esempio tubazioni o gallerie) e con modelli di attenuazione prevedibili [7].

Queste evidenze motivano la definizione di un protocollo leggero e robusto (rilevazione spettrale, soglie adattive con ausilio di machine learning) che faccia uso di componenti economici e facilmente integrabili (microfoni/codec, amplificatori, altoparlanti) per creare un *layer fisico* acustico e il relativo *protocollo di accesso*.

1.5 Contributi attesi

In sintesi, i contributi attesi sono:

1. modellazione e scelta dei parametri del canale acustico in aria in ambienti confinati;
2. progettazione di un protocollo master-slave basato su pattern di frequenze, ACK e gestione del ritardo casuale;
3. implementazione hardware/software a basso costo;
4. validazione sperimentale mediante misure di SPL a diverse distanze, con stima dei livelli attesi per amplificazioni maggiori tramite traslazione dei valori rilevati.

Capitolo 2

Stato dell'Arte

2.1 Tecnologie IoT

L'Internet of Things (IoT) rappresenta una rete di dispositivi fisici, veicoli incorporati con elettronica, software, sensori e connettività di rete. Questi dispositivi sono progettati per raccogliere e scambiare dati, consentendogli di comunicare con l'ambiente circostante. Negli anni diverse tecnologie sono state usate per far comunicare questi dispositivi, la maggior parte di queste si basano su radio frequenze, come LoRa, NB-IoT, ZigBee, Wi-Fi, BLE, fortemente indirizzate ad un uso outdoor o indoor.

Tuttavia, esistono scenari in cui la propagazione elettromagnetica incontra limiti strutturali, ad esempio in ambienti sotterranei, gallerie, miniere o condotti, dove l'attenuazione del segnale cresce a causa della composizione del terreno e dell'umidità. In questi contesti, l'affidabilità della comunicazione wireless tradizionale risulta fortemente compromessa.

2.2 Comunicazione in ambienti sotterranei

La comunicazione in ambienti sotterranei rappresenta una sfida significativa a causa delle caratteristiche uniche di questi ambienti. Le onde elettromagnetiche, comunemente utilizzate per la comunicazione wireless, soffrono di attenuazioni elevate dovute alla permittività, alla conducibilità del terreno e all'umidità, con conseguente riduzione drastica della portata e dell'affidabilità dei link radio [1]. In letteratura è possibile individuare diverse soluzioni proposte per affrontare queste sfide.

In letteratura si riconoscono due linee principali di ricerca:

- l'uso di radio frequenze molto basse (VLF), medie (MF) o più alte (UHF, SHF), adattate a condizioni specifiche;
- l'uso di onde acustiche, che sfruttano la propagazione meccanica del suono attraverso solidi e fluidi.

2.2.1 Radio frequenze

Le ricerche sulle onde elettromagnetiche in gallerie e miniere hanno mostrato limiti significativi: la propagazione è fortemente influenzata dalla geometria degli ambienti e dalle proprietà elettriche del mezzo. Gli studi del U.S. National Institute for Occupational Safety and Health's (NIOSH) Office of Mine Safety and Health Research (OMSHR) [2], avvenuti in seguito a crolli di alcune miniere di carbone in U.S. nel 2006. Questi hanno piantato le fondamenta per l'uso di onde elettromagnetiche SHF/UHF in ambienti sotterranei.

Attraverso una serie di antenne direzionali dalla misura di 1.2 metri e ricevitori collocati prima in linea retta ad una distanza crescente, e poi in presenza di curve a 30°, 60°, 90° e 180° in condotti sotterranei: hanno dimostrato che, in condizioni ottimali, la copertura può raggiungere i 33 metri, ma la presenza di curve strette, biforcazioni o ostacoli riduce drasticamente la portata [2].

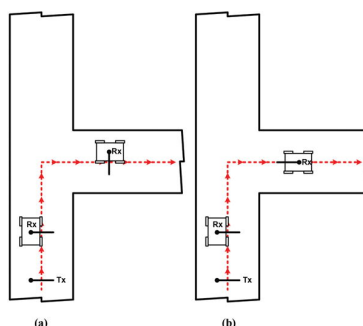


Figura 2.1: Mappa Tunnel U.S. National Institute for Occupational Safety and Health's [2].

Mentre Akyildiz et al. [1] descrivono le difficoltà intrinseche alla propagazione sotterranea a causa di permittività e conducibilità elevate del terreno.

Più in generale, le tecnologie wireless pensate per ambienti sotterranei devono fare i conti con una ridotta penetrazione delle frequenze tradizionalmente usate per IoT. Per questo, l'uso di frequenze estremamente basse (VLF, tra 3–30 kHz) è stato studiato in scenari di emergenza e applicazioni militari, ma presenta limiti di banda e di miniaturizzazione delle antenne [8].

2.2.2 Onde acustiche

Un'alternativa promettente alla comunicazione elettromagnetica in ambienti sotterranei è l'impiego di *onde acustiche* (meccaniche), che si propagano attraverso solidi e fluidi (aria, acqua, fanghi di perforazione). A differenza delle onde EM, la propagazione acustica è spesso meno sensibile alla conducibilità elettrica del mezzo e può seguire percorsi guidati (ad es. lungo tubazioni o gallerie), con migliore resilienza a curve e biforcazioni [9–11].

Modello di canale (cenni). Nei **solidi** (roccia, calcestruzzo, metalli, polimeri), la propagazione è dominata da onde elastiche (longitudinali e di taglio) e, in geometrie guidate (tubi, piastre, travi), da *guided waves* (p.es. onde di Lamb o creep waves) con attenuazione che cresce fortemente con la frequenza e con il disaccoppiamento modale [12].

Nei **fluidi** in condotti (acqua/aria), il canale è tipicamente a bassa frequenza (centinaia di Hz–pochi kHz), con riflessioni multiple e dispersione; in vasche o condotti lunghi si osservano fenomeni di riverbero e frequenze di taglio dei modi guida [9].

Nel **suolo sfuso** (soil), la trasmissione è di tipo acustico/seismico: l'attenuazione dipende da tessitura, umidità e compattazione, ed è marcata oltre poche decine di metri; lo *sweet spot* operativo è in genere sotto i 2–5 kHz per massimizzare SNR a parità di potenza [13, 14].

Hardware e trasduttori. Sono impiegati trasduttori piezoelettrici o magnetostrittivi accoppiati meccanicamente al mezzo (collari su tubi, inserti su rocce/pareti, piastre di accoppiamento).

Nei tubi metallici, coppie di attuatori/ricevitori clamp-on permettono comunicazione non invasiva (senza rompere il tubo), sfruttando onde di taglio o di Lamb [10, 12].

Su polimeri (es. tubi MDPE), l'accoppiamento è più debole e la banda utile è più bassa, ma resta praticabile [11].

Nei fluidi, si usano idrofoni/speaker impermeabilizzati; nel suolo, trasduttori sismici compatti e miniaturizzati sono stati dimostrati in prototipi a bassa potenza [13].

Tecniche di modulazione e codifica. Dato il canale fortemente dispersivo e soggetto a multi-percorso, si adottano modulazioni robuste: FSK/MFSK e BFSK a bassa frequenza per collegamenti affidabili a bassa velocità; OFDM con stime del canale per massimizzare efficienza in condotti lunghi; e codifica con interleaving e rateless/LDPC per gestire *burst errors* [9, 11]. In tubazioni e solidi guidati, è utile

la *modal selection* (scegliere il modo meno attenuato) e la *sub-carrier spacing* adeguata alle *delay spreads* misurate [11, 12].

Prestazioni riportate in letteratura. Risultati sperimentali rappresentativi includono:

- **Suolo (through-soil).** Collegamenti fino a ~50 m con ~20 bps utilizzando portanti a bassa frequenza e trasduttori compatti; dimostrazione di comunicazione digitale robusta in campi prova agricoli [13]. Survey recenti confermano che, per distanze >10–20 m, le velocità realistiche sono dell'ordine di 1–100 bps, con forte dipendenza dal contenuto d'acqua [14, 15].
- **Tubi metallici (acciaio).** Trasmissione di dati via onde elastiche lungo tubazioni esistenti in impianti industriali; dimostrate immagini e pacchetti a centinaia di bps–pochi kbps su decine–centinaia di metri a bassa potenza, sfruttando onde di taglio e di Lamb [10, 12].
- **Tubi in polimero (MDPE).** Misure analitiche/numeriche e in campo mostrano che con segnali a bassa frequenza si ottengono distanze utili per telemetria (decine–centinaia di metri) con bitrate modesto (decine–centinaia di bps) [11, 16].
- **Condotti idrici reali.** Revisione dei test in reti idriche urbane indica fattibilità di reti acustiche in-pipe per monitoraggio/IoT, con vincoli di potenza, sincronizzazione e instradamento; lo stato dell'arte è pre-commerciale ma in rapida evoluzione [9].
- **Fluidi non convenzionale: fango di perforazione.** Sistemi *while drilling* usano la colonna di fluido come canale acustico per telemetria a bassa velocità (bps–decine di bps) su centinaia di metri, con elevata robustezza [17].

2.3 Applicazione della letteratura alla tesi

La tesi si occuperà quindi della creazione di un protocollo di comunicazione acustica per sistemi distribuiti in ambienti sotterranei, basandosi sui risultati e le tecniche di cui sopra, è possibile quindi dedurre alcuni requisiti chiave: Il protocollo opera nella banda 1–9 kHz. Questa scelta è coerente con la letteratura, che evidenzia come nei condotti fluidi l'impiego di frequenze basse consenta di estendere la portata e ridurre l'attenuazione, fenomeno particolarmente critico per le frequenze più elevate [9]

Capitolo 3

Design del Protocollo

3.1 Architettura generale del sistema



Figura 3.1: Livelli del Protocollo

Il protocollo è strutturato in quattro livelli principali, ognuno con una funzione specifica.

3.2 Livello Fisico

Il livello fisico è responsabile della trasmissione dei bit precedentemente composti dal livello Bit. Questo sfrutta uno speaker per la trasmissione e un microfono per la ricezione dei bit che vengono trasmessi mediante coppie superimposte di frequenze.

3.2.1 Ingresso

Il microfono I2S è collegato al microcontrollore ESP32 tramite il bus I2S, sfruttando uno dei due canali disponibili. Il segnale audio viene campionato a 48 kHz con una risoluzione di 16 bit, per poi essere gestito mediante due array in swapping, concetto che verrà approfondito successivamente.

La scelta della frequenza di campionamento deriva dal **teorema di Nyquist-Shannon** [18], secondo il quale un segnale può essere ricostruito senza ambiguità se la frequenza di campionamento f_s è almeno doppia rispetto alla massima frequenza del segnale f_{\max} :

$$f_s \geq 2f_{\max}.$$

Ne consegue che la massima frequenza rappresentabile è

$$f_{\text{Nyquist}} = \frac{f_s}{2}.$$

Nel nostro caso:

$$f_s = 48 \text{ kHz} \Rightarrow f_{\text{Nyquist}} = 24 \text{ kHz}.$$

Poiché l'orecchio umano percepisce frequenze fino a circa 20 kHz [19], la scelta di 48 kHz garantisce la copertura dell'intero spettro udibile, con un margine di sicurezza di 4 kHz. Frequenze prossime al limite teorico di Nyquist risulterebbero invece difficili da catturare senza aliasing, a causa dei limiti pratici dei filtri anti-alias.

Per l'elaborazione, i campioni vengono raccolti in blocchi di lunghezza $N = 512$. Con la frequenza di campionamento fissata:

$$T_{\text{blocco}} = \frac{N}{f_s} = \frac{512}{48 \cdot 10^3} \approx 0.01066 \text{ s}.$$

Ogni blocco di dati rappresenta quindi un intervallo di circa 10.7 ms di segnale audio.

Una volta acquisito il blocco, viene calcolata la **trasformata veloce di Fourier (FFT)** [20] per analizzare lo spettro in frequenza. La complessità della FFT cresce come $N \log_2 N$, e per $N = 512$ si hanno circa:

$$512 \cdot \log_2(512) = 512 \cdot 9 = 4608$$

operazioni complesse.

Sul microcontrollore ESP32 [21], operante a 120 MHz, questo si traduce in un tempo di elaborazione di circa 0.42 ms per blocco, ovvero $\sim 0.83 \mu\text{s}$ per

campione. In termini di carico computazionale: ~ 20 moltiplicazioni, ~ 29 addizioni/sottrazioni e un'operazione di radice quadrata per campione, pari a ~ 99 cicli di clock.

Questo significa che, a fronte di una finestra temporale di 10.7 ms, l'FFT viene calcolata in meno del 5% del tempo disponibile, consentendo un'elaborazione in tempo reale anche senza multi-threading.

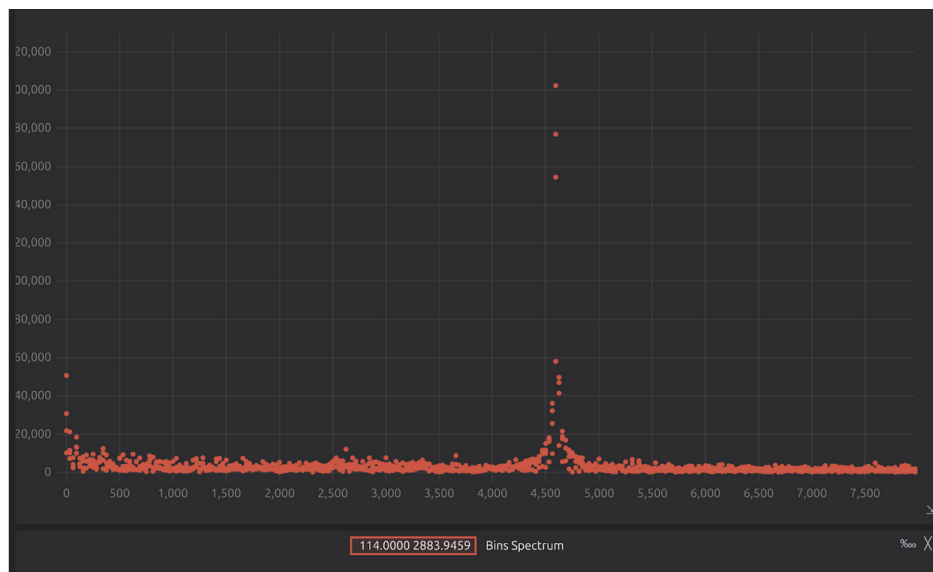


Figura 3.2: Diagramma contenente lo spettro di frequenza calcolato tramite FFT su un blocco di 512 campioni acquisiti a 48 kHz.

Come da Fig. 3.2, si può osservare che lo spettro di frequenza ottenuto dalla FFT mostra picchi alle frequenze di interesse, ma mostra anche un rumore di fondo. Durante la creazione di questo protocollo sono emerse diverse difficoltà legate alla presenza di rumore ambientale, questa condizione ha reso necessario l'uso di tecniche di filtraggio.

3.2.2 Filtraggio

L'idea iniziale, quando il protocollo era ancora nelle prime fasi di vita, era quella di utilizzare una semplice soglia fissa (filtro passa-basso) per discriminare i picchi dal rumore. Tuttavia, questa soluzione si è rivelata inefficace, in quanto i microfoni presentano una risposta in frequenza che cala sulle alte, quindi i livelli in dB delle frequenze alte risultavano attenuati, non facendogli superare la soglia passa basso. Inoltre, il rumore ambientale non è costante, ma varia nel tempo e nello spettro, rendendo difficile stabilire una soglia fissa che funzioni in tutte le condizioni.

Successivamente si è pensato di utilizzare delle soglie fisse, che variassero per ogni frequenza, in modo da tenere conto della risposta in frequenza del microfono. Al fine di calcolare queste soglie, è stato utilizzato un algoritmo di *regressione lineare* per stimare la retta che meglio approssima l'andamento della soglia minima:

$$y = \beta + \beta x + \varepsilon \rightarrow y = -301.751324 \times x + 48531.689491$$

Dove x rappresenta il numero del Bin.

Elenco delle figure

1.1	Corner Loss ~30 dB in un condotto con angolo di 90° per radio frequenze HF/SHF [2].....	3
2.1	Mappa Tunnel U.S. National Institute for Occupational Safety and Health's [2].	6
3.1	Livelli del Protocollo.....	9
3.2	Diagramma contenente lo spettro di frequenza calcolato tramite FFT	11

Elenco delle tabelle

Bibliografia

- [1] I. F. Akyildiz and E. P. Stuntebeck, “Wireless underground sensor networks: Research challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 4, no. 6, pp. 669–686, 2006.
- [2] R. Jacksha and C. Zhou, “Measurement of rf propagation around corners in underground mines and tunnels,” *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, vol. 340, no. 1, pp. 30–37, 2016.
- [3] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*. Wiley, 4th ed., 2000.
- [4] P. M. Morse and K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press, 1986.
- [5] A. D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Acoustical Society of America, 1989.
- [6] A. Heifetz, S. Bakhtiari, X. Huang, R. Ponciroli, and R. B. Vilim, “First annual progress report on transmission of information by acoustic communication along metal pathways in nuclear facilities,” anl/ne-17/30 technical report, Argonne National Laboratory, Nuclear Engineering Division, Argonne, Illinois, Sept. 30 2017. Prepared under contract DE-AC02-06CH11357, UChicago Argonne, LLC.
- [7] M. A. Al Moshi *et al.*, “Wireless underground sensor communication using acoustic technology: A review,” *Sensors*, 2024. Open access review on acoustic WUSNs.
- [8] A. Salam *et al.*, “Taking wireless underground: A comprehensive summary,” *ACM Computing Surveys*, 2023.
- [9] M. Fishta, G. Franceschinis, A. Braglia, Alj, S. Bagheri, and C. Secoleanu, “From radio to in-pipe acoustic communication for smart water networks,” *Information*, vol. 14, no. 8, p. 435, 2023.

- [10] A. Heifetz and et al., “Transmission of information by acoustic communication along metal pathways,” Tech. Rep. ANL-17/13, Argonne National Laboratory, 2017.
- [11] O. O. Farai, J. M. Muggleton, E. Rustighi, and M. J. Brennan, “Analysis of acoustic signal propagation for reliable digital communication along mdpe pipes,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 15, p. 8886, 2023.
- [12] A. Heifetz and et al., “Transmission of images with ultrasonic elastic shear waves on pipes,” Tech. Rep. ANL-20/35, Argonne National Laboratory, 2020.
- [13] S. Yang, A. Kalantari, S. Markham, J. Saniie, and F. Kong, “Development of an underground through-soil wireless acoustic communication system.” Technical Report, University of Illinois Chicago, 2020.
- [14] U. Raza, A. Salam, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “A survey on wireless underground communication with acoustic waves,” *Signals*, vol. 1, no. 1, pp. 21–52, 2020.
- [15] A. Salam, U. Raza, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Wireless underground sensor networks: A comprehensive survey and tutorial,” *ACM Computing Surveys*, vol. 55, no. 12, pp. 1–38, 2023.
- [16] O. O. Farai, *Acoustic Communication in Polymeric Pipes*. PhD thesis, University of Birmingham, 2021.
- [17] Z. Zheng, J. He, Y. Li, X. Liu, and B. Han, “Acoustic wave data transmission while drilling using drilling fluid channel,” *IET Communications*, vol. 17, no. 5, pp. 593–602, 2023.
- [18] C. E. Shannon, “Communication in the presence of noise,” *Proceedings of the IRE*, vol. 37, no. 1, pp. 10–21, 1949.
- [19] E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer, 2nd ed., 1999.
- [20] J. W. Cooley and J. W. Tukey, “An algorithm for the machine calculation of complex fourier series,” *Mathematics of Computation*, vol. 19, no. 90, pp. 297–301, 1965.
- [21] Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, 2020.