

La Metamorfosi del Segnale:

**Il WiFi Sensing e la Nuova Fisica della
Percezione Spaziale**

*Un'Analisi Multidisciplinare tra Fisica delle Onde Radio,
Intelligenza Artificiale, Standardizzazione IEEE 802.11bf
e Implicazioni Etico-Sociali*

Federico Prevosto

Co-Fondatore, GRAL
Torino, Italia

GRAL Research Paper
Aprile 2026

Abstract

Il WiFi Sensing rappresenta un cambio di paradigma nella concezione stessa delle reti wireless: da infrastruttura passiva per il trasporto di dati binari a sistema percettivo attivo, capace di rilevare presenza, movimento, morfologia e persino parametri vitali degli esseri umani attraverso l'analisi delle perturbazioni nel Channel State Information (CSI). Il presente lavoro offre un'analisi multidisciplinare e sistematica di questa tecnologia emergente, integrando le basi fisiche della propagazione multi-percorso, le architetture di deep learning per la stima della posa umana, i meccanismi di identificazione biometrica passiva, il monitoraggio contactless dei segni vitali e le implicazioni etiche e di sicurezza. Si esamina in profondità lo standard IEEE 802.11bf, pubblicato nel settembre 2025, che sancisce il passaggio ufficiale del WiFi da mezzo di comunicazione a sensore nativo. Vengono analizzate le frontiere più recenti della ricerca, inclusa l'integrazione dei Large Language Models (LLM) con i dati CSI, gli attacchi avversariali ai sistemi di sensing e le contromisure di privacy. Il paper si conclude con una visione prospettica sulle sfide aperte e sulle direzioni future della ricerca, delineando un quadro in cui ogni ambiente connesso diventerà intrinsecamente consapevole della presenza e dello stato di salute dei suoi occupanti.

Parole chiave: *WiFi Sensing, Channel State Information, IEEE 802.11bf, Deep Learning, DensePose, Biometria Passiva, Monitoraggio Vitali Contactless, Privacy, Attacchi Avversariali, Large Language Models, Intelligenza Ambientale.*

Indice

Indice

Abstract

1. Introduzione

- 1.1 Il Paradosso dell'Invisibilità Percettiva
- 1.2 Contesto e Motivazioni
- 1.3 Obiettivi e Struttura del Lavoro

2. Fondamenti Fisici della Propagazione Radio e CSI

- 2.1 Meccanica della Propagazione Multi-Percorso
- 2.2 Dall'RSSI al CSI: Una Rivoluzione nella Granularità
- 2.3 Il Modello di Fresnel

3. Architetture di IA per il WiFi Sensing

- 3.1 Dal Segnale Grezzo alla Comprensione Semantica
- 3.2 DensePose from WiFi
- 3.3 RF-Pose e Person-in-WiFi
- 3.4 Implementazioni Open-Source

4. Biometria Passiva: L'Identità nel Segnale

- 4.1 L'Impronta Digitale Wireless
- 4.2 Riconoscimento dell'Andatura
- 4.3 Onde Millimetriche
- 4.4 Autenticazione Palmare

5. Monitoraggio Contactless dei Segni Vitali

- 5.1 Il Router come Diagnostica Passiva
- 5.2 Tecniche di Estrazione
- 5.3 Applicazioni Cliniche e Domiciliari

6. Lo Standard IEEE 802.11bf

- 6.1 Genesi e Standardizzazione
- 6.2 Architettura Tecnica
- 6.3 Sensing Bistatico e Multistatico

7. Sicurezza, Attacchi Avversariali e Privacy

- 7.1 Il Paradosso della Privacy
- 7.2 Tassonomia degli Attacchi
- 7.3 Contromisure e Difese

8. WiFi Sensing e Large Language Models

- 8.1 Wi-Chat e IoT-LLM

8.2 Ragionamento su Dati Sensoriali

8.3 Intelligenza Ambientale

9. Campi di Applicazione Reali

9.1 Sicurezza Invisibile

9.2 Smart Care e Fall Detection

9.3 Gestione Energetica

9.4 Interazione Uomo-Macchina

9.5 Automotive

10. Sfide Aperte e Direzioni Future

10.1 Generalizzazione Cross-Domain

10.2 Scalabilità Multi-Persona

10.3 Robustezza

10.4 Integrazione con il 6G

10.5 Intelligenza Ambientale Universale

11. Conclusione

Riferimenti Bibliografici

1. Introduzione

1.1 Il Paradosso dell'Invisibilità Percettiva

Fino a pochi anni fa, il segnale WiFi era concepito esclusivamente come un vettore per il trasporto di dati binari — una corrente invisibile di informazioni codificate, la cui unica funzione riconosciuta era connettere dispositivi tra loro e alla rete globale. Le onde elettromagnetiche emesse dai router domestici e aziendali attraversavano corpi, pareti e arredi senza che a queste interazioni venisse attribuito alcun valore informativo. Le perturbazioni subite dal segnale durante la propagazione multi-percorso erano considerate rumore da minimizzare, non dati da estrarre.

Tuttavia, la ricerca scientifica degli ultimi dieci anni ha rivelato un paradosso fondamentale: proprio quelle distorsioni considerate indesiderate contengono un'enorme ricchezza informativa sull'ambiente fisico attraversato. Ogni riflessione, assorbimento e scattering del segnale costituisce, di fatto, un'impronta digitale dello spazio e dei corpi che lo occupano. Il WiFi Sensing è la disciplina che inverte la prospettiva tradizionale, trasformando il router da semplice nodo di comunicazione a sofisticato sensore ambientale, capace di “vedere” attraverso ostacoli opachi senza l'ausilio di telecamere, sensori indossabili o alcun dispositivo aggiuntivo.

1.2 Contesto e Motivazioni

La necessità di monitorare gli spazi interni è cresciuta esponenzialmente negli ultimi anni, trainata da molteplici fattori convergenti. L'automazione industriale richiede sistemi di consapevolezza spaziale per garantire la sicurezza degli operatori nelle linee di produzione. L'assistenza sanitaria remota, accelerata dalla pandemia di COVID-19, necessita di strumenti di monitoraggio continuo per pazienti fragili e anziani in contesti domiciliari. Le smart home di nuova generazione richiedono sistemi adattivi che comprendano non solo se una stanza è occupata, ma da chi, in quale postura e con quali parametri vitali.

Le tecnologie tradizionali di sensing ambientale presentano limiti strutturali significativi che il WiFi Sensing promette di superare. Le telecamere, pur offrendo la massima risoluzione percettiva, sollevano gravi problemi di privacy e sono inefficaci in condizioni di scarsa illuminazione o occlusione. I sensori a infrarossi passivi (PIR) hanno una portata limitata, non distinguono tra esseri umani e animali domestici, e non forniscono informazioni sulla posa o sull'identità. I dispositivi indossabili (wearable) richiedono manutenzione costante, conformità da parte dell'utente e non funzionano se dimenticati o rimossi. I sistemi LiDAR e radar dedicati, pur essendo efficaci, comportano costi hardware elevati e consumi energetici significativi.

Il WiFi Sensing supera questi ostacoli sfruttando un'infrastruttura già onnipresente e operativa in quasi ogni ambiente abitato del pianeta. Secondo le stime più recenti, nel 2025 esistono oltre 20 miliardi di dispositivi WiFi attivi nel mondo. Questa ubiquità rappresenta un vantaggio competitivo senza precedenti: non è necessario installare nuova hardware, ma semplicemente estrarre informazioni già contenute nei segnali esistenti.

1.3 Obiettivi e Struttura del Lavoro

Il presente lavoro si propone di offrire un'analisi completa, rigorosa e aggiornata del WiFi Sensing, organizzata secondo una struttura multidisciplinare che riflette la complessità intrinseca del campo. La Sezione 2 presenta i fondamenti fisici della propagazione radio e l'architettura del Channel State Information. La Sezione 3 esamina le architetture di intelligenza artificiale impiegate per la stima della posa umana e il riconoscimento delle attività. La Sezione 4 esplora le frontiere della biometria passiva e dell'identificazione individuale. La Sezione 5 analizza il monitoraggio contactless dei segni vitali. La Sezione 6 è dedicata allo standard IEEE 802.11bf. La Sezione 7 affronta le questioni di sicurezza, attacchi avversariali e privacy. La Sezione 8 presenta la convergenza emergente tra WiFi Sensing e Large Language Models. La Sezione 9 illustra i campi applicativi reali. Infine, la Sezione 10 delinea le sfide aperte e le direzioni future.

2. Fondamenti Fisici della Propagazione Radio e Channel State Information

2.1 Meccanica della Propagazione Multi-Percorso

Il principio fisico alla base del WiFi Sensing risiede nell'interazione fondamentale tra le onde elettromagnetiche e la materia. Un segnale WiFi, trasmesso nelle bande di frequenza a 2.4 GHz, 5 GHz e, più recentemente, 6 GHz, non percorre un unico cammino rettilineo dal trasmettitore al ricevitore. Al contrario, le onde radio subiscono una complessa serie di fenomeni fisici durante la propagazione: riflessione sulle superfici rigide (pareti, pavimenti, mobili), diffrazione attorno agli spigoli, scattering sulle superfici irregolari e assorbimento da parte di materiali con elevato contenuto d'acqua.

Il corpo umano, composto per circa il 60% d'acqua, agisce come un ostacolo dinamico particolarmente significativo per le onde radio nelle frequenze WiFi. La costante dielettrica dell'acqua a 2.4 GHz è circa 80, ordini di grandezza superiore a quella dell'aria (circa 1). Questo implica che il corpo umano riflette, assorbe e scherma una porzione significativa dell'energia elettromagnetica incidente. Quando una persona si muove all'interno di un ambiente, altera dinamicamente i percorsi di propagazione del segnale, generando variazioni misurabili nella risposta del canale radio.

Il risultato è il fenomeno della propagazione multi-percorso (Multi-path Propagation): il segnale trasmesso raggiunge il ricevitore attraverso centinaia o migliaia di traiettorie diverse, ciascuna con un ritardo temporale, un'attenuazione e uno sfasamento specifici. La sovrapposizione coerente di tutti questi percorsi al ricevitore genera un pattern di interferenza complesso che cambia in funzione della geometria dell'ambiente e della posizione dei corpi al suo interno.

2.2 Dall'RSSI al CSI: Una Rivoluzione nella Granularità

Per decenni, l'unico indicatore di qualità del canale radio comunemente accessibile è stato il Received Signal Strength Indicator (RSSI), una misura scalare della potenza complessiva del segnale ricevuto. L'RSSI presenta limitazioni fondamentali per il sensing: essendo un singolo valore aggregato, non può distinguere tra le variazioni indotte da diverse sottoportanti né catturare le informazioni di fase, risultando sensibile al rumore e alle fluttuazioni ambientali.

La vera rivoluzione è arrivata con il Channel State Information (CSI), reso accessibile a partire dallo standard IEEE 802.11n e successivi. Negli standard WiFi moderni, la trasmissione utilizza la tecnologia OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), che divide il canale radio in molteplici sottoportanti ortogonali. Il CSI cattura la risposta del canale per

ciascuna sottoportante individualmente, fornendo una descrizione vettoriale complessa del canale radio:

$$H(f, t) = A(f, t) \cdot e^{j\varphi(f, t)}$$

dove H è la risposta del canale in frequenza, $A(f, t)$ rappresenta l'ampiezza della sottoportante alla frequenza f e al tempo t , e $\varphi(f, t)$ la fase corrispondente. In un sistema WiFi con 56 sottoportanti e 3 antenne, il CSI produce una matrice 3×56 di valori complessi per ciascun pacchetto ricevuto, con una frequenza di acquisizione che può raggiungere i 1000 pacchetti al secondo.

Questa granularità spettrale e temporale è la chiave che ha aperto la porta al WiFi Sensing moderno. Analizzando la variazione temporale della matrice CSI su tutte le sottoportanti e le antenne, è possibile isolare le frequenze Doppler indotte dai movimenti umani, separandole dal contributo statico dell'ambiente circostante.

2.3 Il Modello di Fresnel e la Sensibilità ai Micro-Movimenti

Un aspetto spesso trascurato nella letteratura divulgativa, ma fondamentale per comprendere la sensibilità del WiFi Sensing, è il modello delle zone di Fresnel. Quando un corpo si muove all'interno della prima zona di Fresnel tra trasmettitore e ricevitore — la regione ellissoidale in cui la differenza di cammino ottico è inferiore a mezza lunghezza d'onda — le variazioni del CSI sono massime. A 5 GHz, la lunghezza d'onda è di circa 6 cm, il che significa che spostamenti dell'ordine di pochi centimetri possono generare variazioni di fase significative.

Questa sensibilità submillimetrica alla fase è ciò che rende possibile il monitoraggio dei micro-movimenti, come le oscillazioni della gabbia toracica durante la respirazione (ampiezza tipica: 4-12 mm) e le pulsazioni cardiache trasmesse alla superficie corporea (ampiezza tipica: 0.2-0.5 mm). Il rapporto CSI (CSI-ratio), calcolato tra antenne co-localizzate, consente di eliminare il rumore ambientale comune e isolare le variazioni indotte esclusivamente dal movimento del bersaglio.

3. Architetture di Intelligenza Artificiale per il WiFi Sensing

3.1 Dal Segnale Grezzo alla Comprensione Semantica

Il CSI produce una mole di dati intrinsecamente complessa e rumorosa. I dati grezzi contengono contributi sovrapposti provenienti da sorgenti statiche (pareti, mobili), da interferenze elettromagnetiche e dai movimenti umani di interesse. L'Intelligenza Artificiale interviene per risolvere ciò che in fisica è noto come problema inverso: partendo dalle perturbazioni del segnale ricevuto, ricostruire la causa che le ha generate, ovvero la posizione, la posa e l'identità degli esseri umani nell'ambiente.

L'evoluzione delle architetture di AI applicata al WiFi Sensing può essere suddivisa in tre generazioni distinte. La prima generazione (2015-2018) si basava su metodi di machine learning tradizionali: Support Vector Machines (SVM), Random Forest e Gaussian Mixture Models, alimentati da feature estratte manualmente dai dati CSI (varianza, entropia, coefficienti della trasformata wavelet). Questi metodi raggiungevano accuratezze del 80-90% nel riconoscimento di attività macro (camminare, sedersi, stare in piedi), ma risultavano fragili rispetto ai cambiamenti ambientali.

La seconda generazione (2018-2022) ha introdotto il deep learning end-to-end. Le reti neurali convoluzionali (CNN) trattano i dati CSI come immagini bidimensionali — spettrogrammi tempo-frequenza — identificando pattern discriminanti senza feature engineering manuale. Le reti ricorrenti (LSTM, GRU, BiGRU) catturano le dipendenze temporali nelle sequenze CSI, particolarmente efficaci per il riconoscimento di attività cicliche come la camminata. Architetture ibride CNN-LSTM combinano i vantaggi di entrambi gli approcci.

La terza generazione (2022-presente) è caratterizzata dall'adozione di architetture Transformer e meccanismi di attenzione, capaci di modellare relazioni globali nei dati CSI e di generalizzare meglio attraverso ambienti diversi. I Transformer eccellono nel catturare le correlazioni a lungo raggio tra sottoportanti e istanti temporali, superando le limitazioni del campo ricettivo locale delle CNN.

3.2 DensePose from WiFi: La Stima della Posa Densa

Lo studio seminale "DensePose from WiFi", pubblicato nel gennaio 2023 da un team della Carnegie Mellon University, ha rappresentato una pietra miliare nel campo. I ricercatori hanno dimostrato che è possibile stimare la posa densa del corpo umano — ovvero la corrispondenza punto-a-punto tra la superficie corporea 2D e il modello 3D — utilizzando esclusivamente segnali WiFi standard, senza alcuna telecamera.

L'architettura proposta si articola in tre fasi principali. Nella prima fase, i campioni CSI grezzi (ampiezza e fase) provenienti da tre antenne riceventi vengono sanitizzati attraverso algoritmi di pulizia del segnale. Nella seconda fase, un encoder-decoder a due rami traduce i campioni CSI sanitizzati in mappe di feature 2D che emulano le feature estratte da immagini convenzionali. Nella terza fase, un'architettura DensePose-RCNN modificata utilizza queste feature 2D per stimare mappe UV del corpo umano, rappresentanti la corrispondenza densa tra le coordinate 2D e la superficie 3D del corpo.

Un elemento chiave dell'approccio è il transfer learning: il modello è pre-addestrato su DensePose basato su immagini, e successivamente adattato per accettare input WiFi. Questo permette di sfruttare la ricca conoscenza sulla struttura del corpo umano appresa dal modello visivo. Negli esperimenti, il sistema ha raggiunto una precisione media (AP) dell'87.2% alla soglia IoU del 50%, dimostrando prestazioni comparabili ai sistemi basati su telecamere per la rilevazione della posizione delle persone.

3.3 RF-Pose e Person-in-WiFi: I Precursori

Prima di DensePose from WiFi, due studi fondamentali hanno aperto la strada alla stima della posa umana tramite segnali radio. RF-Pose, sviluppato dal MIT CSAIL nel 2018, ha introdotto per la prima volta l'uso di segnali radio per la stima della posa dello scheletro umano attraverso ostacoli opachi. Utilizzando un dispositivo radio custom operante a frequenze sub-6 GHz, RF-Pose ha dimostrato che è possibile rilevare 14 keypoint del corpo umano attraverso i muri, con una precisione che si avvicina a quella dei sistemi basati su telecamere in linea di vista.

Person-in-WiFi (2019) ha confermato la fattibilità dell'identificazione della forma e dell'identità del corpo umano partendo esclusivamente dai dati CSI estratti da router commerciali. Questo studio ha mostrato che i segnali WiFi standard contengono informazioni sufficienti per la segmentazione corporea e la localizzazione delle persone, senza necessità di hardware specializzato.

3.4 Implementazioni Open-Source e Democratizzazione

Un'evoluzione recente degna di nota è la comparsa di implementazioni open-source che rendono il WiFi Sensing accessibile a ricercatori e sviluppatori. Il progetto RuView, ad esempio, ha reimplementato l'architettura DensePose from WiFi in Rust, raggiungendo una velocità di elaborazione di 54.000 frame al secondo. Il sistema opera su microcontrollori ESP32 dal costo di circa 9 dollari, dimostrando che il WiFi Sensing può funzionare su hardware a bassissimo costo, senza connessione cloud, con elaborazione interamente on-device.

4. Biometria Passiva: L'Identità nel Segnale

4.1 L'Impronta Digitale Wireless

Oltre alla macro-analisi del movimento, la ricerca si sta spingendo verso uno dei territori più affascinanti e al contempo controversi del WiFi Sensing: la biometria passiva. Il principio fondamentale è che ogni individuo ha una massa corporea, un'altezza, un'andatura e una geometria scheletrica uniche, che producono perturbazioni CSI caratteristiche e potenzialmente identificative. In sostanza, il modo in cui una persona perturba un campo elettromagnetico può fungere da "impronta digitale wireless".

La letteratura recente documenta un'intensa attività di ricerca in questo dominio. Un'ampia survey pubblicata nel 2024 su PMC ha sistematizzato le tre fasi principali dell'identificazione umana basata su WiFi: raccolta dei dati CSI, pre-processing (inclusa l'estrazione di feature relative al gait, ai gesti, alla biometria radio e alla frequenza respiratoria) e classificazione tramite modelli di machine learning.

4.2 Riconoscimento dell'Andatura (Gait Recognition)

Il riconoscimento dell'andatura è considerato il meccanismo biometrico più promettente per il WiFi Sensing, in quanto coinvolge il movimento dell'intero corpo, è difficile da falsificare e non richiede alcuna interazione o cooperazione da parte del soggetto. Sistemi come WiWho, WiFi-ID e WiGait hanno dimostrato la fattibilità dell'identificazione individuale analizzando i cicli di camminata riflessi nei pattern CSI.

GaitFi ha proposto un approccio multimodale innovativo che combina segnali WiFi e video per l'identificazione umana, utilizzando una Lightweight Residual Convolution Network come backbone. I risultati hanno mostrato che la fusione dei due moduli percettivi migliora significativamente la robustezza rispetto ai sistemi unimodali, specialmente in condizioni di illuminazione sfavorevole.

Approcci più recenti, come NeuralWave e HumanFi, adottano il deep learning per estrarre automaticamente feature discriminative dal CSI grezzo, superando i limiti dei classificatori tradizionali basati su feature ingegnerizzate. NeuralWiGait integra CNN e BiGRU (Bidirectional Gated Recurrent Unit) in un framework ibrido capace di catturare simultaneamente le feature spaziali e temporali dell'andatura, raggiungendo accuratèzze superiori al 95% in ambienti controllati.

4.3 Verso l'Identificazione Tramite Onde Millimetriche

Una frontiera emergente è l'uso di onde millimetriche (mmWave) WiFi a 60 GHz per l'identificazione delle persone. La ricerca recente ha dimostrato che il CSI a 60 GHz supera

significativamente le prestazioni del CSI a 5 GHz per l'identificazione personale, grazie all'elevata sensibilità spaziale delle onde millimetriche. Modelli come TemporalConvNet e CNN-BiLSTM con attenzione temporale raggiungono accuratezze del 93-96% su dati a 60 GHz, indicando che il WiFi di prossima generazione (Wi-Fi 7 e oltre) porterà miglioramenti sostanziali nella biometria wireless.

4.4 Autenticazione Palmare via WiFi

Un'applicazione particolarmente innovativa è HandPass, un sistema di autenticazione basato sulla scansione CSI della mano. Utilizzando un Raspberry Pi con potenza antenna ridotta a 1 dBm, i ricercatori hanno acquisito dati CSI dalle mani di 20 partecipanti, sfruttando le caratteristiche biofisiche della mano (dimensione, forma, angolazione delle dita, lunghezza delle falangi) come marcatori biometrici. Le alterazioni specifiche del segnale elettromagnetico causate dalla geometria unica di ciascuna mano producono un'impronta CSI identificativa che può essere utilizzata per il controllo degli accessi.

5. Monitoraggio Contactless dei Segni Vitali

5.1 Il Router come Dispositivo di Diagnostica Passiva

Una delle applicazioni più promettenti del WiFi Sensing è il monitoraggio contactless dei parametri vitali: frequenza respiratoria e frequenza cardiaca. Il principio fisico sfruttato è la sensibilità sub-millimetrica della fase CSI ai micro-movimenti della gabbia toracica e della superficie corporea indotti dall'attività cardiopolmonare.

La respirazione genera oscillazioni della parete toracica con ampiezza tipica di 4-12 mm e frequenza di 12-20 atti/minuto nell'adulto sano. L'attività cardiaca genera micro-vibrazioni con ampiezza di 0.2-0.5 mm e frequenza di 60-100 battiti/minuto. Entrambi questi segnali modulano la fase del CSI in modo rilevabile, a condizione che il rumore ambientale e il clutter statico vengano adeguatamente rimossi.

5.2 Tecniche di Estrazione dei Segnali Vitali

La ricerca ha sviluppato due approcci principali per il monitoraggio respiratorio. Il primo utilizza l'elaborazione del segnale CSI nel dominio complesso, applicando filtri passa-banda e analisi spettrale (FFT) per isolare le componenti frequenziali corrispondenti alla respirazione. Il secondo approccio, più recente, sfrutta l'analisi della traiettoria del rapporto CSI (CSI-ratio) nel piano complesso, dove il moto respiratorio genera traiettorie ellittiche caratteristiche.

Per il monitoraggio cardiaco, le sfide sono maggiori a causa dell'ampiezza ridotta delle vibrazioni. Le tecniche avanzate includono la proiezione rotatoria combinata con la selezione adattiva delle sottoportanti (HSR subcarrier selection) e le reti CNN end-to-end che apprendono direttamente la mappatura dai dati CSI grezzi alla frequenza cardiaca. Sistemi ibridi che combinano CSI WiFi con dati mmWave hanno raggiunto accuratezze del 99% nel monitoraggio dei segni vitali in condizioni controllate.

5.3 Applicazioni Cliniche e Domiciliari

Il monitoraggio contactless dei segni vitali ha un potenziale trasformativo in molteplici contesti clinici. Negli ambienti ospedalieri, in particolare nelle unità di terapia intensiva neonatale (NICU), il monitoraggio senza contatto elimina il disagio e il rischio di infezione associati ai sensori adesivi tradizionali. Nelle strutture di assistenza a lungo termine (RSA), il monitoraggio continuo e invisibile dei parametri vitali consente di rilevare precocemente deterioramenti delle condizioni di salute. Uno studio su 612 residenti in cinque strutture di assistenza ha dimostrato che il monitoraggio contactless basato su radar può predire il 77% delle ospedalizzazioni con un anticipo medio di 5.6 giorni.

In ambito domiciliare, il WiFi Sensing può monitorare la qualità del sonno analizzando i pattern respiratori notturni, rilevare apnee, e fornire alert in caso di anomalie senza richiedere alcun dispositivo indossabile. Questa capacità di trasformare il router domestico in un dispositivo di diagnostica passiva rappresenta un cambio di paradigma nell'assistenza sanitaria preventiva.

6. Lo Standard IEEE 802.11bf: Il WiFi Diventa Sensore Nativo

6.1 Genesi e Iter di Standardizzazione

Fino a tempi recenti, il WiFi Sensing è stato limitato dall'assenza di API standardizzate e dall'eterogeneità delle implementazioni proprietarie. La necessità di un framework unificato ha portato alla formazione del Task Group IEEE 802.11bf, discusso per la prima volta nel Working LAN Next-Generation Standing Committee nel luglio 2019. Il progetto è stato ufficialmente autorizzato nel settembre 2020, con l'obiettivo di creare un emendamento allo standard IEEE 802.11 che abiliti in modo nativo le funzionalità di sensing.

L'iter di standardizzazione ha attraversato numerosi cicli di revisione: il Draft 0.1 è stato rilasciato nell'aprile 2022, seguito da molteplici letter ballot e SA ballot con tassi di approvazione crescenti (fino al 96% nella seconda ricircolazione SA di novembre 2024). Lo standard IEEE 802.11bf-2025 è stato ufficialmente pubblicato il 26 settembre 2025, segnando il passaggio definitivo del WiFi da mezzo di comunicazione a piattaforma di sensing.

6.2 Architettura Tecnica dello Standard

L'emendamento IEEE 802.11bf definisce modifiche al livello MAC (Medium Access Control) e alle interfacce di servizio del livello fisico (PHY) per le modalità High Efficiency (HE), Extremely High Throughput (EHT), Directional Multi-Gigabit (DMG) e Enhanced DMG (EDMG). Le bande operative coperte includono le frequenze esenti da licenza tra 1 GHz e 7.125 GHz (2.4, 5 e 6 GHz) e superiori a 45 GHz.

Il framework di sensing WLAN definito dallo standard si articola in cinque fasi operative principali: Sensing Session Setup, in cui due o più stazioni (STA) negoziano i parametri della sessione di sensing; Sensing Measurement Setup, dove vengono configurate le specifiche tecniche della misurazione (sottoportanti, frequenza di campionamento, durata); Sensing Measurement Instance, la fase di acquisizione vera e propria dei dati CSI; Sensing Measurement Termination, per la conclusione ordinata della misurazione; e, infine, la fase di elaborazione dei risultati.

6.3 Sensing Bistatico e Multistatico

Una delle innovazioni chiave dello standard è il supporto per configurazioni di sensing bistatiche e multistatiche. Nel sensing monostatico, trasmettitore e ricevitore coincidono; nel sensing bistatico, sono dispositivi separati; nel sensing multistatico, molteplici dispositivi di produttori diversi collaborano per costruire una mappa percettiva tridimensionale dell'ambiente. Questa interoperabilità multi-vendor è la caratteristica che trasformerà l'ecosistema WiFi da una rete di punti di accesso indipendenti a una mesh percettiva distribuita.

Lo standard garantisce inoltre la retrocompatibilità con i dispositivi IEEE 802.11 esistenti, consentendo una transizione graduale. I router di nuova generazione potranno alternare cicli di trasmissione dati a cicli di scansione ambientale ad alta frequenza, con un'ottimizzazione del time-sharing che minimizza il degrado delle prestazioni di comunicazione.

7. Sicurezza, Attacchi Avversariali e Implicazioni di Privacy

7.1 Il Paradosso della Privacy nel WiFi Sensing

Il WiFi Sensing presenta un paradosso etico fondamentale: la stessa tecnologia che promette di migliorare la sicurezza e la salute senza violare la privacy visiva può, paradossalmente, diventare uno strumento di sorveglianza invisibile ancora più pervasivo delle telecamere. Un attaccante con accesso a un dispositivo WiFi può, teoricamente, rilevare la presenza, il movimento, le attività e persino i tasti digitati dalla vittima senza che questa ne sia consapevole.

La ricerca ha dimostrato che i dataset pubblici di WiFi sensing contengono informazioni private involontarie. Studi hanno evidenziato come i dataset di riconoscimento dei gesti e delle attività possano rivelare attributi privati degli utenti, come altezza, peso e genere, quando sottoposti ad attacchi mirati. Il beamforming feedback, trasmesso in chiaro negli standard 802.11ac e successivi, aggrava ulteriormente l'esposizione alla privacy, consentendo inferenze più accurate su tasti premuti e password.

7.2 Tassonomia degli Attacchi

Un'ampia survey pubblicata nel 2025 ha proposto una classificazione sistematica degli attacchi ai sistemi WiFi Sensing basata su tre ruoli: il sistema wireless come vittima, come arma e come scudo. Analizzando oltre 200 pubblicazioni dal 2020 al 2024, i ricercatori hanno identificato molteplici vettori di attacco che minacciano l'affidabilità e la sicurezza dei sistemi di sensing.

Gli attacchi al bersaglio di sensing comprendono attacchi statici (uso di superfici riflettenti intelligenti per alterare la propagazione), attacchi dinamici (iniezione di movimenti controllati nell'ambiente) e attacchi avversariali (perturbazioni ottimizzate per ingannare i modelli di deep learning). Gli attacchi alla sorgente di sensing includono jamming, spoofing e manipolazione dei simboli pilota dei pacchetti WiFi. Il framework WiIntruder ha dimostrato la fattibilità di attacchi perturbativi universali capaci di degradare simultaneamente le prestazioni di molteplici applicazioni di sensing.

7.3 Contromisure e Difese

La comunità scientifica ha risposto con una serie di contromisure. I sistemi di offuscamento del CSI, come AntiSense e IRShield, introducono randomicità spaziale nel segnale per impedire il sensing non autorizzato pur preservando la qualità della comunicazione. Approcci più recenti propongono tecniche di randomizzazione del canale definite dalla sorgente (source-defined channel randomization) che variano nel tempo i filtri applicati al segnale, impedendo a un attaccante di costruire un modello stabile dell'ambiente.

Sul fronte normativo, la questione della privacy nel WiFi Sensing è ancora largamente inesplorata a livello legislativo. Il GDPR europeo potrebbe essere applicabile nella misura in cui i dati CSI processati consentono l'identificazione di individui specifici, ma manca una giurisprudenza consolidata. Lo standard IEEE 802.11bf include un emendamento separato (802.11bh) dedicato specificamente alla protezione della privacy degli utenti, ma i dettagli implementativi restano oggetto di sviluppo.

8. La Convergenza tra WiFi Sensing e Large Language Models

8.1 Un Nuovo Paradigma: Wi-Chat e IoT-LLM

Una delle frontiere più recenti e concettualmente dirompenti del WiFi Sensing è la sua integrazione con i Large Language Models (LLM). Il 2025 ha visto la pubblicazione di Wi-Chat, il primo sistema di riconoscimento delle attività umane basato su WiFi e alimentato da un LLM. Wi-Chat dimostra che i modelli linguistici possono elaborare segnali WiFi grezzi e inferire attività umane incorporando i principi fisici del WiFi sensing nei prompt, senza ricorrere a tecniche tradizionali di elaborazione del segnale.

L'approccio è concettualmente rivoluzionario: invece di addestrare una rete neurale specializzata per ogni compito di sensing, Wi-Chat sfrutta la capacità di ragionamento zero-shot dei LLM, guidandoli con conoscenze fisiche sulla propagazione del segnale. I risultati sperimentali mostrano che i LLM possono raggiungere prestazioni significative nel riconoscimento delle attività, aprendo un paradigma in cui la comprensione del mondo fisico viene mediata dalla competenza linguistica del modello.

8.2 IoT-LLM: Ragionamento su Dati Sensoriali Reali

Il framework IoT-LLM, pubblicato su Patterns (Cell Press) alla fine del 2025, amplia questa visione proponendo un sistema unificato in cui i LLM ragionano su dati IoT eterogenei, inclusi i dati CSI WiFi ad alta dimensionalità (shape tipica: $T \times 3 \times 114$, dove T è la lunghezza temporale, 3 le antenne e 114 le sottoportanti). Il framework utilizza tecniche di compressione e riduzione dimensionale (PCA) per trasformare i dati CSI in rappresentazioni testualizzate compatibili con l'input dei LLM.

La valutazione del framework su cinque compiti IoT reali — inclusi il riconoscimento di attività umane via WiFi e la localizzazione indoor basata su WiFi — ha dimostrato che i LLM, opportunamente guidati, possono competere con modelli specializzati su compiti sensoriali tradizionali. Questa convergenza tra elaborazione del linguaggio naturale e sensing fisico apre la strada a Personal Health LLMs (Ph-LLMs) capaci di interpretare continuamente i dati WiFi per il monitoraggio proattivo della salute.

8.3 Implicazioni per l'Intelligenza Ambientale

L'integrazione LLM-WiFi Sensing potrebbe trasformare radicalmente il concetto di intelligenza ambientale. In uno scenario futuro, un sistema domestico potrebbe non solo rilevare che un anziano è caduto (sensing), ma anche ragionare sul contesto ("l'utente è caduto nel bagno alle 3 di notte, non si è rialzato da 2 minuti, la frequenza cardiaca è irregolare"),

generare un alert in linguaggio naturale al personale medico e comunicare verbalmente con la vittima tramite un assistente vocale — il tutto senza alcun dispositivo indossabile o telecamera.

9. Campi di Applicazione Reali

9.1 Sicurezza Invisibile e Rilevamento Intrusioni

Il WiFi Sensing consente il rilevamento di intrusioni senza zone cieche e con la capacità di distinguere tra esseri umani e animali domestici attraverso l'analisi della sagoma e dell'andatura riflessa nel segnale. A differenza dei sensori PIR convenzionali, un sistema WiFi Sensing può operare attraverso i muri, coprire un'intera abitazione con una singola coppia trasmettitore-ricevitore e fornire informazioni sulla localizzazione e sull'identità dell'intruso.

9.2 Smart Care e Fall Detection

Il monitoraggio costante di soggetti fragili in ambienti sensibili rappresenta forse l'applicazione più urgente e socialmente rilevante. Nei bagni, dove l'uso di telecamere è precluso per motivi etici e il rischio di cadute è massimo, il WiFi Sensing offre una soluzione unica: monitoraggio continuo della presenza, della postura e dei segni vitali senza alcuna intrusione visiva. Il rilevamento delle cadute (fall detection) è già uno dei use case più maturi, con sistemi commerciali basati su WiFi che raggiungono sensibilità superiori al 95%.

9.3 Gestione Energetica Adattiva

L'ottimizzazione dei sistemi HVAC (riscaldamento, ventilazione e condizionamento) e dell'illuminazione basata sull'effettiva occupazione spaziale e sulla posa degli utenti rappresenta un'applicazione con un impatto economico significativo. A differenza dei sensori di occupazione binari, il WiFi Sensing può determinare il numero esatto di persone in una stanza, la loro posizione e il livello di attività, consentendo regolazioni energetiche granulari e predittive.

9.4 Interazione Uomo-Macchina e Gesture Recognition

Il riconoscimento dei gesti tramite WiFi consente il controllo di dispositivi smart senza contatto e senza dispositivi indossabili. L'utente può controllare luci, elettrodomestici e sistemi di intrattenimento con semplici gesti nell'aria. La ricerca ha dimostrato il riconoscimento affidabile del linguaggio dei segni tramite WiFi (SignFi), aprendo possibilità di comunicazione assistiva per persone con disabilità uditive.

9.5 Automotive e In-Vehicle Sensing

Il WiFi Sensing si estende anche al contesto veicolare. Il sistema V2iFi ha dimostrato la fattibilità del monitoraggio dei segni vitali all'interno del veicolo tramite segnali WiFi, consentendo la rilevazione di stati di sonnolenza del conducente, il monitoraggio dei passeggeri e l'adattamento automatico dei sistemi di comfort senza sensori dedicati.

10. Sfide Aperte e Direzioni Future

10.1 Generalizzazione Cross-Domain

La sfida più significativa per il WiFi Sensing rimane la generalizzazione cross-domain: i modelli addestrati in un ambiente specifico (una stanza con una determinata disposizione dei mobili e uno specifico posizionamento dei dispositivi) tendono a degradare significativamente quando trasferiti in un ambiente diverso. La variabilità della geometria ambientale, delle condizioni di propagazione e delle caratteristiche hardware dei dispositivi rende la generalizzazione un problema aperto di ricerca.

Approcci promettenti includono il domain adaptation non supervisionato, il federated learning per l'addestramento distribuito su ambienti multipli preservando la privacy, e le architetture basate su modelli fisici (model-based) che incorporano la conoscenza della propagazione radio nella struttura della rete neurale, riducendo la dipendenza dai dati di addestramento specifici per l'ambiente.

10.2 Scalabilità Multi-Persona

I sistemi attuali mostrano prestazioni decrescenti quando il numero di persone nell'ambiente supera le 3-5 unità. La separazione dei contributi individuali nel segnale CSI in scenari affollati richiede avanzamenti nelle tecniche di beam-forming, nella risoluzione spaziale dei sistemi MIMO e nelle architetture di attenzione multi-target.

10.3 Robustezza e Sicurezza

Come documentato nella Sezione 7, la vulnerabilità degli attacchi avversariali rappresenta un ostacolo significativo per il deployment in applicazioni safety-critical. La ricerca futura dovrà sviluppare architetture intrinsecamente robuste, tecniche di certificazione formale della robustezza e protocolli di mutua autenticazione tra dispositivi di sensing.

10.4 Integrazione con il 6G e le Reti di Prossima Generazione

Le reti di sesta generazione (6G) previste per il 2030 includeranno nativamente capacità di sensing integrate nella comunicazione (Integrated Sensing and Communication, ISAC). Il WiFi Sensing, con lo standard 802.11bf, anticipa questa convergenza nel dominio delle reti locali. L'interoperabilità tra WiFi Sensing e cellular sensing (5G NR e 6G) creerà ecosistemi percettivi multi-scala, dal livello di stanza (WiFi) al livello urbano (cellular).

10.5 Verso l'Intelligenza Ambientale Universale

La visione a lungo termine è quella di un'intelligenza ambientale universale, in cui ogni ambiente connesso — dalla singola stanza all'edificio, dal veicolo alla città — sia dotato di una consapevolezza percettiva nativa, senza sensori dedicati. Con l'adozione dello standard 802.11bf, già pubblicato, e l'evoluzione dei Large Language Models verso l'interpretazione dei dati sensoriali, questa visione sta rapidamente passando dalla speculazione accademica alla realtà ingegneristica.

La sfida futura non sarà più la copertura del segnale, ma la sua risoluzione percettiva: un mondo in cui l'energia invisibile che ci connette funge anche da custode silenzioso della nostra sicurezza e salute, bilanciando le promesse dell'innovazione con il rispetto irrinunciabile della privacy e della dignità umana.

11. Conclusione

Il WiFi Sensing rappresenta la convergenza definitiva tra telecomunicazioni, intelligenza artificiale e percezione spaziale. Con la pubblicazione dello standard IEEE 802.11bf nel settembre 2025, il WiFi ha cessato ufficialmente di essere esclusivamente un mezzo di comunicazione per diventare una piattaforma di sensing nativa, standardizzata e interoperabile.

La presente analisi ha documentato come questa trasformazione sia sostenuta da solidi fondamenti fisici (la sensibilità sub-millimetrica della fase CSI), architetture di IA sempre più sofisticate (dalle CNN ai Transformer, dal transfer learning agli LLM), applicazioni di rilevanza sociale immediata (monitoraggio degli anziani, fall detection, smart healthcare) e un ecosistema di ricerca in rapida espansione.

Al contempo, il lavoro ha evidenziato le sfide significative che rimangono: la generalizzazione cross-domain, la scalabilità multi-persona, la robustezza agli attacchi avversariali e, soprattutto, il paradosso etico di una tecnologia che promette privacy visiva ma abilita potenzialmente una sorveglianza ancora più pervasiva. La comunità scientifica e i legislatori dovranno lavorare in sinergia per garantire che l'intelligenza ambientale del futuro sia non solo tecnicamente efficace, ma eticamente sostenibile.

In conclusione, il WiFi Sensing non è semplicemente una nuova funzionalità aggiunta ai router: è un cambio di paradigma nella relazione tra gli esseri umani e l'ambiente elettromagnetico che li circonda. Per la prima volta nella storia della tecnologia, l'energia invisibile che ci connette può anche comprenderci.

Riferimenti Bibliografici

- [1] J. Geng, D. Huang, F. De La Torre, "DensePose From WiFi," arXiv:2301.00250, Carnegie Mellon University, 2023.
- [2] M. Zhao, T. Li, M. Abu Alsheikh, Y. Tian, H. Zhao, A. Torralba, D. Katabi, "Through-Wall Human Pose Estimation Using Radio Signals (RF-Pose)," MIT CSAIL, CVPR 2018.
- [3] F. Wang, S. Zhou, S. Panev, J. Han, D. Huang, "Person-in-WiFi: Fine-grained Person Perception Using WiFi," ICCV 2019.
- [4] T. Ropitault, S. Blandino, A. Sahoo, N. Golmie, "IEEE 802.11bf: Enabling the Widespread Adoption of Wi-Fi Sensing," IEEE Communications Standards Magazine, 2023.
- [5] Y. Ma, G. Zhou, S. Wang, H. Zhao, W. Jung, "An Overview on IEEE 802.11bf: WLAN Sensing," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024.
- [6] IEEE Std 802.11bf-2025, "Amendment 4: Enhancements for Wireless LAN Sensing," IEEE Standards Association, Published September 26, 2025.
- [7] X. Liu, X. Meng, H. Duan, Z. Hu, M. Wang, "A Survey on Secure WiFi Sensing Technology: Attacks and Defenses," Sensors, 25(6), 1913, 2025.
- [8] M. Alhazbi et al., "WiFi-Based Human Identification with Machine Learning: A Comprehensive Survey," PMC, 2024.
- [9] H. Zhang, et al., "Wi-Chat: Large Language Model Powered Wi-Fi Sensing," arXiv:2502.12421, 2025.
- [10] T. Zhu, et al., "IoT-LLM: A Framework for Enhancing Large Language Model Reasoning from Real-World Sensor Data," Patterns (Cell Press), 2025.
- [11] Y. Lang, et al., "GaitFi: Robust Device-Free Human Identification via WiFi and Videos," IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, 2022.
- [12] J. Jiang, S. Jiang, Y. Liu, et al., "Wi-Gait: Pushing the Limits of Robust Passive Personnel Identification Using Wi-Fi Signals," Computer Networks, 229, 2023.
- [13] Z. Wu, et al., "NeuralWiGait: An Accurate WiFi-based Gait Recognition System Using Hybrid Deep Learning Framework," The Journal of Supercomputing, 2025.
- [14] N. Bhat, et al., "Beyond Sub-6 GHz: Leveraging mmWave Wi-Fi for Gait-Based Person Identification," arXiv:2510.08160, 2025.
- [15] L. Silva, et al., "HandPass: A Wi-Fi CSI Palm Authentication Approach for Access Control," arXiv:2510.22133, 2025.
- [16] S. Zhou, W. Zhang, et al., "Adversarial WiFi Sensing for Privacy Preservation of Human Behaviors," IEEE Communications Letters, 24(2), 2020.
- [17] C. Li, M. Xu, et al., "Practical Adversarial Attack on WiFi Sensing Through Unnoticeable Communication Packet Perturbation," ACM MobiCom, 2024.
- [18] Y. Zhou, C. Li, et al., "RIStealth: Practical and Covert Physical-Layer Attack Against WiFi-Based Intrusion Detection via RIS," ACM SenSys, 2023.
- [19] M. Cominelli, F. Gringoli, R. Lo Cigno, "AntiSense: Standard-Compliant CSI Obfuscation Against Unauthorized Wi-Fi Sensing," Computer Communications, 185, 2022.
- [20] J. Chen, et al., "Privacy-preserving WiFi Sensing in WSNs via CSI Obfuscation," Computers & Security, 2025.

- [21] Y. Shi, X. Zhang, L. Fu, H. Zhang, "An Investigation of the Private-Attribute Leakage in WiFi Sensing," *High-Confidence Computing*, 4, 2024.
- [22] M. S. Raheel, et al., "Contactless Vital Sign Monitoring Systems: A Comprehensive Survey," *Sensors & Diagnostics*, RSC Publishing, 2024.
- [23] J. Sun, X. Bian, M. Li, "Non-Contact Heart Rate Monitoring Method Based on Wi-Fi CSI Signal," *Sensors*, 2024.
- [24] P. Sruthi, S. K. Udgata, "Wi-Fi Sensing Based Person Identification and Activity Recognition Using Two-Phase Deep Learning Model," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 132, 2024.
- [25] L. Zhang, et al., "A Comprehensive Survey on Wi-Fi Sensing for Human Identity Recognition," *Electronics*, 12(23), 4858, 2023.
- [26] S. Shang, et al., "WirelessLLM: Empowering Large Language Models Towards Wireless Intelligence," arXiv:2405.17053, 2024.
- [27] RuView Project, "WiFi DensePose: Real-time Human Pose Estimation via WiFi Signals," GitHub, 2025.
- [28] R. K. Liu, et al., "Origin Wireless AI: IEEE 802.11bf WiFi Sensing Project," *Origin Wireless AI*, 2022-2025.
- [29] L. Lu, et al., "An Imperceptible Eavesdropping Attack on WiFi Sensing Systems," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 32, 2024.
- [30] Y. Chen, et al., "A Survey of Wireless Sensing Security from a Role-Based View: Victim, Weapon, and Shield," arXiv:2412.03064, 2024.
- [31] L. Xu, et al., "Integration of LLMs and the Physical World: Research and Application," *ACM Digital Library*, 2024.
- [32] Tapestry Health / Neteera Technologies, "Contactless Remote Patient Monitoring in Long-Term Care: Collaborative Study on 612 Residents," 2025.
- [33] T. Zheng, Z. Chen, C. Cai, J. Luo, X. Zhang, "V2iFi: In-Vehicle Vital Sign Monitoring via Compact RF Sensing," 2020.
- [34] WhoFi: WiFi-Based Person Identification Using Deep Neural Networks with Transformer Encoding, NTU-Fi Dataset, Accuracy up to 95.5%, Rome-based researchers, 2025.
- [35] IEEE 802.11bh-2024, "Amendment: Enhancements for User Privacy Protection," Published June 3, 2025.