

# Detettore di Ruota Piatta e Portale in linea per verifica di sagoma

Moreno Pieralli\*, Andrea Bracciali\*\*, Gaetano Cascini\*\*\*

\*Siliani Elettronica ed Impiani S.p.A., Firenze

\*\* Ricercatore, Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università di Firenze

\*\*\* Dottorando di ricerca, Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università di Firenze

## Introduzione

Nella prima parte del lavoro viene valutato un sistema diagnostico, sviluppato dopo numerose campagne prova in linea, dedicato alla rilevazione e quantificazione delle sfaccettature durante il normale passaggio dei convogli a velocità dell'ordine di 30-80 km/h. Il sistema è basato sull'uso di sensori piezoelettrici e sull'analisi dei segnali rilevati mediante la funzione *cepstrum*.

I benefici derivanti dall'introduzione di questo strumento consistono nella rilevazione precoce e nella conseguente possibilità di eliminazione delle sfaccettature prima che i danni loro imputabili possano assumere entità rilevante.

Lo sviluppo di un portale in grado di verificare i fuori sagoma sui convogli ferroviari in piena velocità, da posizionarsi sulle linee di transito, capace di determinare con elevata sicurezza la presenza di sporgenze pericolose e le eventuali anomalie di carico, viene descritto nella seconda parte del lavoro.

## 1 La sfaccettatura delle ruote

### 1.1 Generalità

Sebbene gli impianti antipattinanti divengano sempre più sofisticati, la percentuale di sfaccettature presente nei rotabili è sempre piuttosto elevata. Limitandoci al nostro paese, il fenomeno è particolarmente importante per materiale leggero frenato a dischi con peso frenato elevato (ALe 642, carrozze MD, carrozze Z) soggetto a numerose frenate a fondo. La frenatura a dischi comporta una rugosità superficiale bassa che favorisce il bloccaggio, mentre materiale frenato a ceppi, quale i carri merci che pure sono soggetti a notevoli variazioni di carico, risentono in misura minore del problema.

### 1.2 La detezione delle difettosità

Le forze di contatto ruota-rotaia sono responsabili di accelerazioni molto elevate in un range di frequenza assai esteso. Le apparecchiature in commercio per la rilevazione delle sfaccettature sono basate sulla misura delle accelerazioni in numerosi

punti distribuiti su alcuni metri di rotaia, in modo che l'urto della ruota sulla rotaia dovuto alla sfaccettatura avvenga con la massima probabilità su un sensore. La Sil-e-i ha sviluppato, con la collaborazione del Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali dell'Università di Firenze, una nuova attrezzatura basata sull'impiego di un sensore innovativo (il cavo piezoelettrico) e di un algoritmo di rilevazione (che utilizza la funzione *cepstrum*) che consente di ridurre drasticamente il LCC dell'installazione, aumentando l'affidabilità e la disponibilità del dispositivo.

Nella presente memoria ci si limita, per motivi di spazio, a dare una breve illustrazione del funzionamento dell'apparecchiatura e si accenna alle possibilità di impiego reali. Per ulteriori dettagli si vedano [X,Y].

### 1.3 Il sensore utilizzato

L'ambiente ferroviario è caratterizzato da un'aggressività particolare nei confronti delle apparecchiature che devono essere montate sul binario. Le intemperie, le temperature estreme, le sollecitazioni meccaniche elevatissime, le gravose interferenze elettromagnetiche, impongono una robustezza assoluta alle apparecchiature da montare sulla rotaia. I sensori di vibrazione disponibili, quali gli accelerometri industriali, rispondono alle esigenze suddette ma con un costo troppo elevato. Nel corso della ricerca, la Siliani si è quindi orientata verso l'individuazione di un trasduttore alternativo, di basso costo e di affidabilità assoluta, che fosse pienamente compatibile con l'impiego ferroviario. Il cavo piezoelettrico si è rivelato un ottimo trasduttore: poco costoso, insensibile ai disturbi elettromagnetici, con dinamica

enorme (oltre 200 dB), facilmente condizionabile elettricamente, praticamente eterno, esso è stato calibrato per confronto con accelerometri di misura convenzionali (fig. 1). Esso è un normale cavo coassiale nel quale l'effetto piezoelettrico del dielettrico fra anima e calza è massimizzato, anziché minimizzato come nei cavi per il trasporto di segnale, per cui è possibile raccogliere una carica che dipende dalle vibrazioni misurate nelle tre direzioni ortogonali.

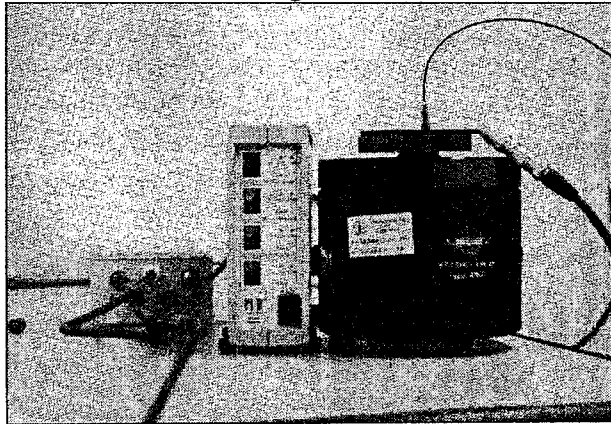


Fig. 1. Calibrazione del cavo piezoelettrico per confronto con un accelerometro di misura montato su una tavola vibrante [X].

Durante le diverse campagne prova effettuate il sensore è stato montato, in diverse lunghezze, in diverse posizioni sulla rotaia ed in diversi modi. Ovviamente la soluzione finale per il montaggio discende dall'evidenza sperimentale che una lunghezza del cavo intorno a 50 mm è sufficientemente sensibile e non è talmente elevata da introdurre una riduzione della dinamica (il cavo è un integratore, per cui una lunghezza di 2 m, ad esempio, consente di rilevare frequenze soltanto fino a circa 1 kHz, considerando che la velocità di propagazione delle onde nel ferro è di circa 5 km/s). Due posizioni si sono rivelate valide per il posizionamento del cavo, cioè quelle mostrate in fig. 2. Per chiari motivi di semplicità di montaggio (non si richieda la foratura della rotaia per il passaggio dei tiranti delle ganasce) la posizione ritenuta ottimale è quella individuata con la lettera A.

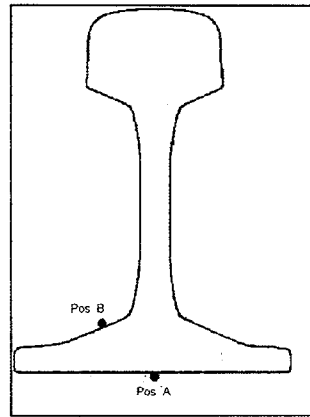


Fig. 2. Posizioni ottimali dei cavi piezoelettrici sotto una rotaia UIC 60.

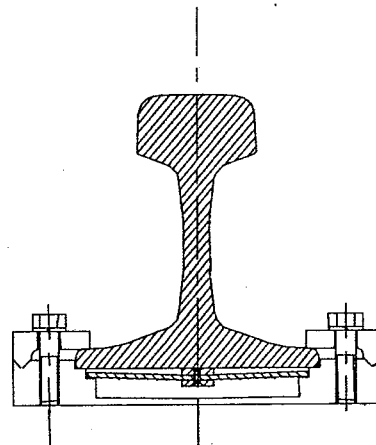


Fig. 3. Particolare del montaggio del cavo piezoelettrico in posizione A con l'attrezzatura.

Per mantenere il cavo fissato in posizione A è stata sviluppata un'attrezzatura di supporto, schematicamente illustrata in fig. 3, che ha ingombri ridotti, estrema semplicità di montaggio, basso costo e garantisce il precarico di montaggio mediante la flessione di una lamina di acciaio calibrata. L'adattamento ai diversi tipi di rotaia è immediato modificando spessori e lunghezze della lamina e dei blocchetti interposti.

#### 1.4 Misure in linea e algoritmo di detezione

Pur senza entrare nel dettaglio della conduzione delle prove, si riporta in fig. 4 un esempio di segnale registrato da un cavo in posiz. A e la corrispondente analisi *cepstrum*.

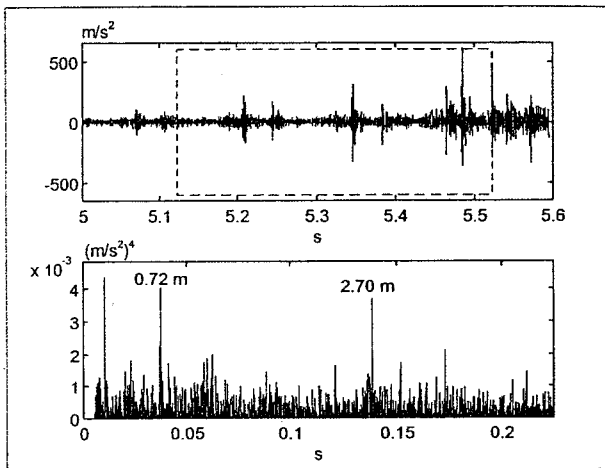


Fig. 4. Segmento di segnale registrato dal cavo piezoelettrico al passaggio di una vettura MD. L'analisi *cepstrum* evidenzia le coppie di picchi (udite come "martellamenti") all'approssimarsi del carrello [Y].

La funzione *cepstrum*, utilizzata in numerose applicazioni di ricerca ed industriali (si veda [Y] per la bibliografia), consente di evidenziare ripetizioni nel segnale senza effettuare controlli di soglia, e quindi consentendo di individuare con grande precisione le sfaccettature. Sebbene la funzione principale del detettore sia quella di individuare le ruote con difettosità *locali*, altrettanto importante può rivelarsi, in particolari condizioni, la detezione di ruote con difettosità *globali*, quali la poligonazione, che sono altrettanto pericolose. Per determinare questa difettosità si ricorre ad una più semplice stima dell'energia del segmento di segnale considerato, con la precisazione che dalle ruote frenate a ceppi è da attendersi un valore energetico decisamente alto, superiore in molti casi a quello di ruote difettate ma frenate a dischi.

Ovviamente resta critica la definizione della difettosità tollerabile. È noto dalla letteratura che le sfaccettature più pericolose sono quelle appena create, che non sono state ancora "ammorbidite" dal flusso plastico del materiale ai bordi della sfaccettatura. La probabilità di identificare il prima possibile questa situazione suggerisce l'uso di un certo numero di rilevatori, disposti lungo le linee

ferroviarie, che consentano di scartare il rotabile danneggiato al più presto. A tal proposito occorre ricordare che la fisica dell'urto sfaccettatura-rotaia è tale per cui i massimi effetti si hanno nel *range* di velocità 30÷80 km/h, decisamente comodo nei tratti di accesso alle principali stazioni della rete e degli impianti di manutenzione.

### 1.5 La soluzione ingegnerizzata

Per la definizione della soluzione ingegnerizzata si è tenuto conto delle esigenze dell'elaborazione e dell'ambiente ferroviario.

L'*hardware* sul binario consiste nel detettore ed in due pedali contaassi Sil-e-i (tre se il binario è percorso nei due sensi) per la misurazione della velocità del convoglio in transito. A lato del binario vi è il condizionatore di segnale (amplificatore di carica) nonché l'apparecchiatura per la trasmissione in fibra ottica del segnale analogico.

L'*hardware* di calcolo è costituito da un PC industriale di elevata qualità prodotto dalla National Instruments (PXI) che ingloba anche la scheda acquisizione dati che campiona e digitalizza i vari segnali. Questa soluzione, che prevede l'uso di una garitta o, meglio, di un fabbricato, non è critica, dato che la locazione ideale del detettore è appunto in prossimità delle stazioni. L'uso di *hardware* di elevato livello facilita le operazioni di manutenzione in termini di costo e di garanzia di mantenimento delle prestazioni nel tempo. La parte *software* consiste nel sistema operativo Microsoft Windows NT e nel programma di calcolo sviluppato negli ambienti LabVIEW e Matlab. L'algoritmo di calcolo individua le porzioni di segnale sulle quali compiere l'elaborazione e, quando si siano raggiunte condizioni di pericolosità (superamento di soglie prestabilite), lancia un allarme ad una postazione remota. La gestione del PC è assicurata a distanza mediante software commerciale di telecontrollo.

## 2 Portale in linea per la verifica di sagoma

### 2.1 Generalità

Il portale POLIS è capace di segnalare i fuori sagoma anche su convogli in transito a piena velocità, quando posizionato su linee ferroviarie operative.

Il principale obiettivo del portale POLIS è quello di rivelare, con elevata affidabilità, la presenza di sporgenze pericolose ed eventuali anomalie del carico, utilizzando una moderna ed innovativa elettronica capace di risolvere i seguenti problemi operativi:

- determinazione del fuori sagoma con precisione laterale di  $\pm 1$  cm
- spessore o diametro equivalente dell'ostacolo minimo rilevabile di 1 cm
- velocità del convoglio in transito compresa fra 1 e 150 Km/h (250 Km/h max)
- capacità di adattamento a diversi tipi di sagome UIC e nazionali
- operatività ogni tempo e giorno/notte
- estreme condizioni meteo e di temperatura
- determinazione, per classificazione, del livello di pericolosità del fuori sagoma
- visualizzazione in differita da parte del centro operativo dei fuori sagoma rivelati

### 2.2 Architettura del portale

La sviluppo del portale POLIS si basa quindi sulle seguenti soluzioni tecnologiche:

- uso di due differenti tipi di rivelatori elettro-ottici combinati in "dual-technology mode"
- barriera doppia ad IR progettata per operare in avverso ambiente ferroviario
- ripresa televisiva combinata con illuminazione laser allo stato solido (LD) o LED a luce strutturata
- classificazione della tipologia dell'ostacolo mediante processazione in sito
- trasmissione, su richiesta, dell'immagine della zona che ha causato un sicuro allarme
- supervisione e valutazione finale del rischio dal centro di controllo

Il portale è pertanto costituito dai seguenti complessi fondamentali:

- un numero discreto di barriere ad IR capace di definire con delle spezzate la sagoma limite almeno nelle zone di maggior importanza
- su segnalazione delle barriere od anche in forma indipendente, un sistema TV con speciale processazione dell'immagine analizza e classifica la tipologia del fuori sagoma
- entrambe le informazioni sono processate per generare un allarme da inviare al centro di controllo e se necessario alla locomotiva di testa

Per questo scopo POLIS è costituito da:

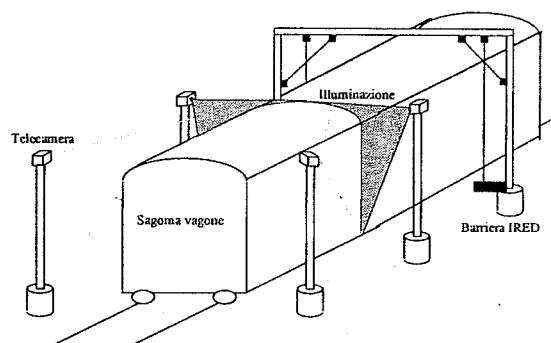


Figura 5 – Struttura del portale

- struttura meccanica di supporto dei sensori che abbraccia entrambe le linee di transito senza significative vibrazioni e deformazioni
- barriere ad alta definizione a raggi infrarossi IR ad alta intensità, protette dall'influenza del sole e dall'occultamento dovuto alla ridiffusione da neve, pioggia o nebbia
- sistema di televisione sia ad IR che nel visibile, con illuminazione laser/LED bistatica strutturata dotato di processazione per la rivelazione dei fuori sagoma, adattabile a diverse sagome standard, progettato per operare anche in condizioni meteo avverse
- sistema di processazione e di fusione dati intelligente per auto-apprendimento con

una gestione delle sagome e dell'immagine adattiva, controllabile a mezzo di un link di comunicazione e di controllo a distanza

Con lo scopo di evitare gli effetti di saturazione ed accecamento causati dal sole, la lunghezza d'onda della luce (di trasmissione foccheggiata per le barriere e di illuminazione strutturata per la detezione ostacoli TV) che viene utilizzata in questo portale, è opportunamente posizionata in una stretta banda degli IR laddove la luce solare, a causa dell'assorbimento atmosferico, è ridotta ad un minimo. La ripresa delle immagini per la valutazione degli ostacoli avviene invece o con luce solare o per illuminazione diretta in luce bianca.

Le sorgenti di illuminazione della barriera e della luce strutturata, che si accendono solo per il passaggio di un convoglio, sono entrambe allo stato solido e sono costituiti:

a) - per le barriere,

da LED (Ligth Emitting Diode), che emettono una luce ad altissima intensità in una banda stretta localizzata sui 950 nanometri, impulsati per ottenere un alto rendimento ed una minima sensibilità alla turbolenza indotta dai fenomeni meteo offrendo inoltre una altissima affidabilità e vita estesa.

b) - per la TV bistatica,

da Laser a semiconduttore con una ottica integrata per creare una luce strutturata che assume una forma di lamina o striscia, che "affetta" il convoglio in transito con una illuminazione laterale di spessore inferiore ai 2 cm. E' in corso di valutazione l'uso di una cortina in linea composta con moderni emettitori allo stato solido ad alta intensità LED che offrono il vantaggio di maggior flessibilità installativa ed affidabilità. (TBV).

c) - per le riprese di immagine TV,

da normali lampade alogene in proiettori standard. Queste ultime sono accese solo per un allarme di fuori sagoma o su richiesta del centro di controllo e quindi con cicli di lavoro estremamente bassi. La vita e l'affidabilità di questo tipo di illuminazione è inoltre garantito

da ridondanza di fari e una sottoalimentazione (circa 80 %) delle lampade che viene favorita dalla sensibilità delle camere TV allo stato solido capaci di coprire un vasto spettro di emissioni che vanno dal visibile agli IR.

### 2.3 Le barriere a raggi infrarossi IR (BIR)

Sono costituite da una componente ottica ed una elettronica. La parte ottica è realizzata da:

- un emettitore IR di piccole dimensioni (3 mm) accoppiato ad una lente piano convessa di 1,5 cm.,
- un rivelatore di radiazioni IR integrato accoppiato ad una identica lente di 1,5 cm. di diametro,
- due tubi parasole di 1,5 cm e di lunghezza di 8 cm. Hanno il duplice scopo di limitare il campo di vista (FOV, Field Of View) ed impedire che la sporcizia raggiunga le lenti),
- i due sistemi ottici (trasmettitore e ricevitore) sono montati affiancati ed illuminano un retroriflettore catarifrangente che può essere distante fino a 10 mt. Si realizza in questo modo un "tubo" di luce IR di diametro di 1,5-3 cm pressoché costante su tutte le linee di detezione, che per bersagli di 1 cm dà la precisione richiesta. Il contorno "fuori sagoma" può essere convenientemente analizzato con un numero minimo di linee di detezione.

Con lo scopo di lavorare nelle condizioni estreme di luce solare e di condizioni meteo le barriere sono provviste di emettitori ad alta intensità impulsati ad elevata frequenza di ripetizione in modo di poter intercettare anche i piccoli ostacoli alla massima velocità del treno, ovvero con tempi di transito brevi. Con un esempio di estremi valori, qualora un ostacolo di spessore 1 cm transiti alla massima velocità di 250 Km/h, permane nel fascio all'incirca per 0,5 millisecondi. Gli impulsi generati sono di breve durata per migliorare la reiezione alla diffusione dei disturbi meteo ed ottenere un basso ciclo di lavoro, con lo scopo di ottimizzare l'affidabilità.

La rivelazione da parte del ricevitore è coerente in modo da ottenere la minima banda

necessaria e la massima reiezione dei disturbi esterni. Tale coerenza, resa possibile dalla vicinanza fisica dell'emettitore al rivelatore, permette un basso consumo, una ottima stabilità di funzionamento ed un circuito relativamente poco complesso. Queste caratteristiche sono importanti per raggiungere una ottimale riduzione delle dimensioni e dei costi allo scopo di potere impiegare più di un elemento spaziatore per la detezione di una singola linea di fuori sagoma. Con due linee di detezione separate di circa 1 mt è quindi possibile mediante una correlazione temporale, evitare i falsi allarmi che possono insorgere a causa di occultazione di oggetti occasionali (sacchetti di plastica, carta, ecc.) mossi dalle turbolenze causata dal treno. Un allarme positivo sarà causato da una precisa sequenza temporale di due attraversamenti correlati alla velocità del treno.

Allo scopo di determinare dinamicamente il fuori sagoma inserito in 6 spezzate sono necessarie 6 barriere elementari, oppure 12, se si implementa la correlazione temporale anti falsi allarmi sopra descritta, ma non sempre necessaria.

#### 2.4 La TV bistatica

La sicurezza e la positività di un allarme generato dalla Barriera ad IR sono date dalla presenza di un secondo sistema, (dual-technology mode), costituito da un sistema Televisivo con illuminazione Strutturata Bistatica. Un laser allo stato solido LD o una cortina lineare di LED all'IR (IRED), installata sul portale, di supporto alle barriere, proietta una lamina di luce perpendicolare e larga non più di qualche centimetro sul treno, illuminandolo per tutta l'altezza della sua sagoma. Una Telecamera ortogonale a questa lamina, osserva e controlla la sola zona compresa fra le pareti del treno ed il portale e stabilisce, mediante un programma software facilmente modificabile ed adattabile, le linee di fuori sagoma anche multistandard. La presenza di un ostacolo al di là di una di queste linee viene rivelata tramite un programma di estrazione all'interno di un

calcolatore. La luce strutturata è convenientemente posizionata sulla lunghezza d'onda di 950 nm per ottenere il massimo contrasto nei confronti della luce ambiente. In pratica la camera TV non vede nessuna immagine del treno se non quella delimitata dalla lamina di luce strutturata ottenendo così una discriminazione spaziale in profondità nel confronto del FOV dell'immagine TV.

La metodologia di estrazione di un allarme è la seguente:

- - l'immagine ripresa dalla telecamera è formata da un numero rilevante di punti (pixel), all'incirca 440.000 (768x576), ciascuno con una dinamica in intensità di 256 livelli di grigio. Da tutti i pixel dell'immagine il calcolatore estrae solo quelli compresi fra una sagoma limite minima e una massima (filtraggio spaziale che grazie alla luce strutturata è limitata ad una geometria bidimensionale)
- - sull'immagine residua, che sarà costituita dalla linea di illuminazione laser (in pratica il profilo di una sezione del treno) fortemente contrastata su uno sfondo scuro, viene effettuato un filtraggio spettrale, utilizzando filtri digitali analoghi a quelli utilizzati nella compressione dei dati. Questo mette in evidenza i contorni della striscia luminosa per le successive elaborazioni (filtraggio dei contorni).
- - Viene applicata una soglia di intensità il cui valore non è fisso, ma calcolato in base al numero di pixel chiari rispetto agli scuri, per tenere conto delle variazioni non controllabili della luminosità ambiente. La logica attribuisce ad i punti sotto la soglia un valore 0 e quelli sopra la soglia il valore 1 (filtraggio dinamico sull'intensità)
- - sulla matrice dei pixel estratti in forma 0-1, viene applicato un algoritmo adattivo per la riduzione dei falsi allarmi che considera valide solo le sequenze non discontinue di alcuni bit a valore 1, nelle direzioni sia orizzontale che verticali. Le sequenze accettate devono risultare più

lunghe di un valore collegato alla risoluzione spaziale richiesta. (processazione CFAR, Constant False Alarm Rate)

- I dati ricavati a questo punto vengono analizzati da un sistema di intelligenza artificiale per una prima classificazione del tipo di fuori sagoma
- - una seconda processazione può essere ripetuta dopo un certo intervallo di moto del treno con l'ausilio di una seconda illuminazione strutturata: il confronto con i dati estratti precedentemente è una precisa indicazione della consistenza dinamica del fuori sagoma. Se l'ostacolo è variato o scomparso si ha la certezza di un oggetto in movimento come ad esempio un telone libero che svolazza, mentre se il confronto è costante indicherà un oggetto fisso, rigido e pericoloso.

La correlazione dei segnali ottenuti con questo processo e la concomitanza dell'allarme dato dalle barriere genererà un allarme da inviare al Centro di Controllo.

Completa il sistema una seconda telecamera operante nel visivo, per illuminazione diurna od artificiale, che entra in funzione dopo la generazione di un allarme per immagazzinare una sequenza limitata di immagini relative alla zona che ha fatto scattare l'allarme. Successivamente le diverse sequenze televisive vengono immesse in una memoria e trattenute per: essere inviate su richiesta del Centro di Controllo su linea telefonica come immagini in video compresso secondo i recenti standard, oppure, registrate per una successiva analisi.

## 2.5 Conclusioni

Nel presente lavoro sono state illustrate due attrezzature di notevole utilità nel settore ferroviario per la verifica a terra del materiale rotabile. Il portale Polis è tuttora in corso di avanzato sviluppo presso la società Siliani Elettronica ed Impianti di Firenze (SIL.E.I).

Per quanto riguarda il detettore di ruota piatta, al momento della stesura della presente memoria (15.9.98) sono in fase di ultimazione gli accordi tra FS e SIL.E.I per l'effettuazione di una campagna provè nella quale due convogli di ALe 642 (MRRS+SRRM) con difettosità note saranno fatti circolare accoppiati a velocità diverse per individuare le soglie citate nel paragrafo precedente. In ogni caso lo strumento sviluppato rappresenta indubbiamente un valido ausilio per la gestione ottimale della manutenzione e per evitare che le sovrasollecitazioni legate alle sfaccettature portino a cedimenti prematuri sale, boccole e rotaie.

[X] A. Bracciali, G. Cascini, M. Pieralli: "A Wheelflat Detection Device Based on Cepstrum Analysis of Rail Acceleration Measurements", Atti del *World Congress on Railway Research WCRR '97*, vol. D, pagg. 513-521, Firenze, Italy, 1997.

[Y] A. Bracciali, G. Cascini: "Detection of Corrugation and Wheelflats of Railway Wheels using Energy and Cepstrum Analysis Of Rail Acceleration", *Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 211, 1997, pagg. 109-116.

[W] B.P. Bogert, M.J.R. Healy, J.W. Tukey: "The Quefrency Alalysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo-Autocovariance, Cross-Cepstrum and Saphe Cracking", *Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis*, J. Wiley & Sons, New York, 1963, 209-243.

[Z] M.P. Norton: "Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers", Cambridge University Press, New York, 1992.