



La geometria del binario – Apparecchiature di misura e criteri di analisi

Track geometry – Measurement equipment and analysis criteria

Dott. Ing. Francesco NATONI^(*)

SOMMARIO – I perfezionamenti apportati alle strumentazioni di misura e la possibilità di elaborazione rapida e massiva dei dati registrati consentono una approfondita conoscenza dello stato geometrico del binario. Ciò non di meno, a causa delle intrinseche limitazioni dei sistemi di misura e di alcune inadeguatezze dei criteri di analisi, devono essere ammesse soglie d'incertezza sull'effettiva entità e configurazione della geometria misurata. L'adozione di complessi metodi di riproduzione della misura e l'integrazione di criteri, tra loro diversificati, consentono, però, di controllare tali incertezze entro limiti accettabili.

Partendo da un breve richiamo sullo sviluppo recente delle apparecchiature di misura, l'articolo propone alcune considerazioni sui metodi di analisi della geometria del binario, ponendo in risalto quanto le attuali tecniche di elaborazione possono, in prospettiva, fornire risultati del tutto soddisfacenti anche per i binari a più elevate prestazioni.

1. Introduzione

Tra le materie di maggior interesse, per il Tecnico dell'armamento, rientra lo *"stato geometrico del binario"*, ossia quanto attiene allo scartamento, al livello trasversale, allo sghembo, al livello longitudinale ed all'allineamento.

Infatti, a queste grandezze è correlata la qualità di marcia del treno: tanto maggiori sono gli scostamenti, rispetto ai valori fissati dal progettista, tanto più il veicolo è soggetto a moti perturbatori che si aggiungono a quelli propri dovuti alle caratteristiche del tracciato teorico. Se le anomalie, che entro certi limiti pregiudicano soltanto il comfort dei viaggiatori, crescono oltre certe soglie - anche per la mutua interazione con i rotabili - potrebbero essere raggiunte situazioni di pericolo.

Ne deriva che la misurazione ed il controllo della geometria del binario sono fondamentali per il gestore dell'infrastruttura.

Si aggiunge, altresì, che soltanto una conoscenza effettiva della difettosità - e del suo trend nel tempo - consente interventi manutentivi mirati ed efficaci, limitando il costo

SUMMARY – The improvements made to measurement equipment and the possibility of processing recorded information in a rapid and massive way allows an in-depth knowledge of the geometric status of the track. Nevertheless, due to the intrinsic limitations of the measurement systems and of some inadequacies of the analysis criteria, uncertainty thresholds must be allowed on the actual size and configuration of the measured geometry. The adoption of complex measurement reproduction methods and the integration of criteria, different to each other, however allow to control such uncertainties within acceptable limits.

Starting from a brief reference to the recent development of measurement equipment, the article proposes some considerations on track geometry analysis methods, highlighting how the current processing techniques can, in perspective, give completely satisfying results even for tracks with the highest performances.

1. Introduction

"The geometric status of the track" is among the most interesting topics for a permanent way Technician, that is to say what deals with the gauge, the transversal level, the twist, the longitudinal level and the straightening of the track.

In fact, the trains travelling quality is related to these dimensions: the greater the gaps compared to the values fixed by the project manager, the more the vehicle is subject to disturbing movements that go on top of those due to the features of the theoretic alignment.

If the anomalies, that compromise just the passengers' comfort within certain limits, increase beyond certain limits – also due to the mutual interaction with rolling stock – dangerous situations may be posed.

The result is that the measurement and control of the track's geometry are essential for the infrastructure manager.

Moreover it must be added that only actual knowledge

^(*) Dirigente Italferr a.r.

^(*) Italferr retired Manager

SCIENZA E TECNICA

d'esercizio dell'impianto a quanto realmente necessario.

Ci si riferisce non soltanto alla manutenzione corretiva per la eliminazione dei "difetti rilevanti" [ossia quei difetti la cui entità e conformazione è tale da richiedere soggezioni all'esercizio] ma, anche, alla manutenzione "on condition" che tende a sostituire la manutenzione "ciclica" [quali sono i livellamenti sistematici che si ripetono a scadenze fisse]. Infatti, la stima della necessità dell'intervento, la sua localizzazione e la procedura operativa da impiegare dipendono dall'esame delle registrazioni che, con l'impiego di apposite tecniche interpretative, fornisce gli Indici di Qualità della sovrastruttura.

Il rilievo, la misurazione, l'analisi delle misure ed il giudizio sullo stato del binario [in sintesi la "diagnistica"] richiedono, pertanto, strumenti di misura e tecniche di analisi appropriate, evolute ed allineate a quanto la tecnologia di settore propone.

Ma insieme alle motivazioni gestionali, la materia in argomento presenta non indifferente interesse ingegneristico - anche retrospettivo - sia per le strumentazioni e le attrezzature utilizzate per il rilievo in linea che per le procedure di analisi delle misure, ivi compresi gli algoritmi matematici di calcolo ed i software applicativi.

Si ricorda che la valutazione quali-quantitativa dello stato geometrico del binario era fatta (in alcuni casi ciò avviene tuttora) mediante ispezioni in linea assistite da mezzi e strumenti manuali: i risultati delle misurazioni, lente ed onerose, erano affetti da inevitabili errori ed approssimazioni, ma, soprattutto, riportavano la situazione geometrica del binario scarico, necessariamente differente dall'assetto sotto carico.

Lo sviluppo delle strumentazioni di rilievo, che fin dalle origini dell'esercizio delle linee ferroviarie rappresentavano quanto di meglio la tecnica di settore poteva offrire, e la loro collocazione a bordo di veicoli, così da poter misurare in movimento, ha consentito di superare le criticità innanzitutto richiamate.

La disponibilità, infine, di computer di crescenti prestazioni ha permesso l'adozione di metodi di analisi rapida dei dati, con possibilità, quindi, di produrre rapporti di sintesi e di dettaglio, non solo a tavolino - tramite successivo riversamento delle misure - ma durante il rilievo in corsa, che con i mezzi più moderni può arrivare ai 200 km/h e più.

E', però, evidente che il circolo virtuoso, da un lato l'industria che propone appareati in rapida evoluzione tecnologica, dall'altro l'esercente la sovrastruttura che ha necessità - specialmente per le linee AV - di misure precise ed attendibili, si prospetta come una risorsa in crescita, con un ulteriore potenziale d'innovazione.

2. Le misure

Si considerano - secondo una antica ma longeva consuetudine - *grandezze geometriche caratteristiche* del binario:

of the defectiveness – and of its trend over time – allows aimed and efficient maintenance interventions, limiting the operating cost of the system to what is strictly necessary.

Reference is not only made to corrective maintenance for the elimination of "important defects" (that is those defects whose size and shape is such to affect the operation) but also to "on condition" maintenance that tends to replace "cyclic" maintenance [such as systematic levelling operations that are repeated at fixed deadlines].

In fact, the evaluation of the need for intervention, its localisation and the operational procedure to be used depend on the examination of the recordings that supplies the Quality Indexes of the superstructure, through the use of specific interpretative techniques.

Therefore, the survey, the measurement, the analysis of the measures and the judgement on the condition of the track [in short the "diagnostics"] require appropriate measurement tools and analysis techniques, fully advanced and aligned with what the technology field offers.

But together with the management reasons, the topic concerned has a considerable engineering as well as retrospective interest – both for the tools and the equipment used for the survey in line and for the analyses procedures of the measures, including the mathematical calculation algorithms and the software applications.

It must be remembered that the qualitative and quantitative evaluation of the track's geometric status was performed (in some cases this still occurs) through inspections in line supported by manual and instrumental means: the results of the measurement, slow and somewhat burdensome, were affected by unavoidable errors and approximations, but above all, they reported the geometric situation of the unloaded track, necessarily different from the configuration under load.

The development of the survey instrumentation, that represented the best that the field technique could offer right from the beginning of the operation of the railway lines and their arrangement on board the vehicles, in such a way as to allow measurement during movement, has allowed to overcome the above-mentioned criticalities.

Lastly, the availability of computers with increasing performances has allowed to adopt rapid information analyses methods, with the possibility therefore of producing summarised and detailed reports, not only in theory – through subsequent dumping of the measures – but also during survey in movement, that can reach 200 km/h and over with the most modern means.

It is however evident that the virtuous circle, on the one side the industry that proposes equipment with a fast technological development, on the other side the operator of the superstructure that needs precise and reliable measures – especially for the HS lines, promises to be like a growing resource with further innovation potential.

SCIENZA E TECNICA

- il livello longitudinale, misurato come scostamento verticale, per ogni progressiva di binario, del piano di rotolamento della rotaia rispetto alla posizione di riferimento;
- l'allineamento longitudinale, ovvero la misura dello scostamento, in direzione ortogonale all'asse del binario, di una stabilità generatrice della rotaia rispetto al suo andamento planimetrico di riferimento;
- lo scartamento;
- il livello trasversale;
- lo sghembo.

Pur meritando lo scartamento, il livello trasversale e lo sghembo pari attenzione, si considerano, nel presente articolo, le sole caratteristiche di livello e di allineamento, perché la loro misurazione e la relativa elaborazione delle registrazioni, non invarianti rispetto al sistema di misura, è di maggiore interesse.

Infatti, sia lo scartamento che il livello trasversale possono essere misurati direttamente e lo sghembo è una grandezza derivata dal livello trasversale e tali possibilità rendono l'osservazione delle misure scevra dalle problematiche riconducibili alla conformazione della strumentazione di misura.

Dunque, il *livello longitudinale* rappresenta, lungo l'ascissa *s* del binario e per ciascuna delle due rotaie, il "difetto" del profilo che, per un binario teorico esente da difetti, è costituito da rette (le livellette) e dai raccordi cilindrici. L'*allineamento*, invece, rappresenta il difetto rispetto al tracciato planimetrico che - in astratto - è dato da rette, curve circolari e relativi raccordi.

Riprendendo una classificazione data dal Comitato ORE⁽¹⁾ C 152, i rilievi quantitativi di livello e di allineamento possono essere eseguiti:

- tramite misure "manuali" geodetiche classiche;
- mediante apparecchiature, istallate a bordo di veicoli specializzati, che riproducono una "immagine" della geometria;
- mediante la registrazione delle reazioni dinamiche del veicolo in moto sul binario difettato.

2.1. Le misure geodetiche

Le misure geodetiche si avvalgono di strumentazioni e di procedure di misura derivate da quelle topografiche in uso nella Ingegneria Civile.

Nella fig. 1 i punti A, B, C sono punti fissi di coordinate note (Est, Nord, quota) ottenuti dal raffitimento della rete di capisaldi di base progettuali (o di rilievo dell'esistente infrastruttura).

2. The measures

According to an ancient but longeal custom – the following are considered as *typical geometric sizes* of the track:

- the longitudinal level, measured as vertical gap, for each track point, of the rail's running surface compared to the reference position;
- the longitudinal alignment, or rather the size of the gap, in the orthogonal direction towards the centre of the track, of a set track generating line with respect to its reference planimetric trend;
- the gauge;
- the transversal level;
- the twist.

Although the transversal level and the track distortion deserve equal attention, this article only considers the level and alignment characteristics because their measurement and relevant processing of recordings, not invariant compared to the measurement system, is of greater interest.

In fact, both the gauge and the transversal level can be measured directly and the twist has a size deriving from the transversal level and these make observation of the measures free from problems ascribable to the conformation of the measurement instrumentation.

Hence, the *longitudinal level* represents the "defect" of the profile, along the "*s*" axis of the track and for each of the two rails that, for a theoretic track without defects, consists of straight lines (gradients) and of cylindrical transitions. The *alignment*, instead represents the defect compared to the planimetric layout that – in the abstract – is given by the straight lines, circular curves and related transitions.

Going back to a classification given by the ORE⁽¹⁾ C 152 committee, the quantitative and alignment level surveys can be performed:

- through "manual" classic geodetic measurements;
- through equipment that reproduces an "image" of the geometry, installed on board the specialised vehicles;
- through the recording of dynamic reactions of the moving vehicle on the defective track.

2.1. Geodetic measures

The geodetic measures make use of instrumentation and measurement procedures deriving from the topographic one used by Civil Engineering.

Points A, B, and C in fig. 1 are fixed points of known coordinates (East, North, altitude) obtained through

⁽¹⁾ Ente di ricerca ferroviaria, emanazione dell'UIC, oggi ERRI.

⁽¹⁾ Railway research agency, emanation of the UIC, today ERRI.

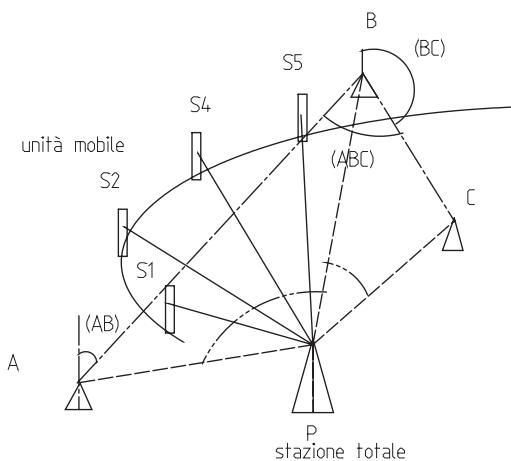


Fig. 1 - Intersezione inversa - Problema di Pothenot. *Reverse intersection – Pothenot Problem.*

Con lo strumento "stazione totale" in P, mediante intersezione inversa sui punti dati A, B, C, si ottengono le coordinate di P, misurando gli angoli APB e BPC.

Infatti, risolvendo il problema di Pothenot, con le coordinate note di B, e C (che forniscono le distanze AB e BC) si ottengono gli azimut (AB) e (BC) e conseguentemente il valore dell'angolo ABC. Con questi valori calcolati e con gli angoli misurati, tramite passaggi trigonometrici, si trovano le coordinate di P.

Posto, ora, in P uno strumento (usualmente quello impiegato come "stazione totale") che sia in grado di fornire le coordinate polari di una diottura posta sull'unità mobile S, si ottengono - con gli adatti calcoli - le coordinate dei punti di stazione S1, S2, ecc. rispetto alla "stazione totale" e, quindi, nel riferimento dei punti fissi. Naturalmente, si sarebbe ottenuto lo stesso risultato ponendo reiteratamente la "stazione totale" lungo il binario, ma con notevoli maggiori peridimenti.

Se i punti di stazione sono riferiti ad un punto di riferimento convenzionale del binario (p.es. la generatrice a -14 mm dal piano di rotolamento della rotaia - di una delle due fughe) si ricavano le posizioni planimetriche del binario, nel già ricordato riferimento di punti fissi, per tutte le sezioni correnti.

Estendendo il sistema alle coordinate zenitali, con analogo procedimento - oppure con livellazione di precisione - si ottiene l'altimetria del binario rilevato. Per tener conto della sopraelevazione del binario, la diottura è montata su un carrello che misura - per ogni sezione - la sopraelevazione stessa: nota questa è possibile determinare l'andamento altimetrico netto del binario.

Poiché dai calcoli di progetto è nota la planimetria e l'altimetria del binario (in quanto il tracciato è una suc-

thickening of the basic project datum point network (or of surveys of the existing infrastructure).

The P coordinates are obtained by measuring the APB and BPC angles with the "total station" instrument through reverse intersection on A, B and C given points.

In fact, solving the Pothenot problem with the known B and C coordinates (that give distances AB and BC) the azimuths (AB) and (BC) are obtained and consequently the value of the ABC angle. With these calculated values and with the measured angles, the P coordinates are found through trigonometric steps.

Now assuming that an instrument (usually the one used as "total station") is placed in P and is capable of giving the polar coordinates of a dioptric placed on the S mobile unit, the S1, S2 etc. station point coordinates are obtained - with the appropriate calculations - with respect to the "total station" and therefore in the fixed points reference. The same result would have of course been achieved by placing the "total station" repeatedly along the track, but with considerable greater waste of time.

If the station points refer to a standard reference point of the track (e.g. the generating line at -14 mm from the running surface of the rail - or one of the two rail stretches) the planimetric positions of the track are found for all the actual sections, in the already mentioned fixed points reference.

Extending the system to the zenithal coordinates with a similar procedure - or with precision levelling - the altimetry of the detected track is obtained. In order to take into account the cant of the track, the dioptric is assembled on a trolley that measures the cant itself for each section: knowing this, it is possible to determine the net altimetry trend of the track.

Since the plan and the altimetry of the track are known from the project calculations (as the lay-out is a series of curves and straight stretches leaning on the basic topography) the algebraic differences, calculated for each section at the abscissa s, between the measured coordinates and the project ones give the *levelling and alignment geometry absolute error*.

If having changed the sign, such error is applied to a piece of operating equipment - that knows its position with significant precision (point S) - such as movement (vertical and transversal to be given to the track), the track will have returned to its theoretic project position⁽²⁾ upon termination of the operation.

Point "s" must be precisely identified so as to avoid further defects being generated following the correction of an improper error.

⁽²⁾ The procedure is actually more complicated: in fact, the control system of the track movement parts must take into account as far as possible, that when a track section is moved, also the near sections are moved due to the rigidity of the track: the rear ones are moved out of the correct position, the front ones are no longer in the measured position upon correction.

SCIENZA E TECNICA

cessione di curve e rettificati appoggiati alla topografia di base) le differenze algebriche, calcolate per ogni sezione posta alla ascissa progressiva s, tra le coordinate misurate e quelle di progetto fornisce l'*errore assoluto di geometria di livellamento e di allineamento*.

Se tale errore, cambiato di segno, viene imposto ad una macchina operatrice - che conosca con apprezzabile precisione la sua posizione (progressiva S) - come spostamento (verticale e trasversale da dare al binario), alla fine della operazione il binario sarà tornato nella posizione teorica di progetto⁽²⁾.

La progressiva s deve essere individuata con precisione ad evitare che la correzione di un errore improprio generi ulteriore difetto.

Nella tabella 1 è riprodotto un esempio di tabellazione di un tratto di curva di una linea AV (c.d. puntuazione) che riporta le coordinate geodetiche: detta tabella che fa parte della documentazione "Come Costruito" servirà di base per i riscontri che si volessero operare con il metodo descritto.

Table 1 shows an example of scheduling of a curve stretch of a HS line reporting the geodetic coordinates: such table that is part of the "As Built" documentation will be basically needed for comparisons that one may wish to make with the described method.

As one can notice, the points are at a 1 m distance and there are East and North coordinates for each section (they are respectively equal to the x and y axis of a Cartesian reference in topography).

With simple operations⁽³⁾ the deviation angle is obtained for each section that falls in the 4th quadrant in the example shown and increases with the point. It therefore deals with a track whose increasing points are turned towards South-East and in a curve of radius R = 5976 m; from the altitudes the line section is in rising gradient with an average slope of approximately 8.7%.

To sum up, the geodetic measures allow the determination of the size of the defect - through comparison between the representation of the theoretic geometry of the

TABELLA 1 – TABLE I

Progr. binario dispari <i>Odd track</i> kilometric point [mm]	Est b.d. [decimi di mm] <i>East Odd track</i> [tenths of mm]	Nord b.d. [decimi di mm] <i>North Odd</i> track [tenths of mm]	Quota Altitude [mm]	h (cm) h (cm)	Est b.p. [decimi di mm] <i>East Even</i> track [tenths of mm]	Nord b.p. [decimi di mm] <i>North Even</i> track [tenths of mm]	P %° P %°	Interasse Distance between centres of tracks [mm]
154301000	4403259856	5776159502	191739	-9.5	4403225320	5776123346	8	4999.99
154302000	4403267087	5776152596	191747	-9.5	4403232558	5776116434	9	4999.94
154303000	4403274320	5776145690	191756	-9.5	4403239797	5776109522	9	4999.96
154304000	4403281555	5776138786	191765	-9.5	4403247037	5776102613	8	4999.98
154305000	4403288790	5776131883	191773	-9.5	4403254278	5776095704	9	5000
154306000	4403296026	5776124982	191782	-9.5	4403261521	5776088796	9	5000.02
154307000	4403303264	5776118081	191791	-9.5	4403268764	5776081890	9	5000.04
154308000	4403310503	5776111182	191800	-9.5	4403276009	5776074985	8	5000.06
154309000	4403317743	5776104284	191808	-9.5	4403283255	5776068081	9	5000.08
154310000	4403324984	5776097387	191817	-9.5	4403290502	5776061179	9	5000.03
154311000	4403332226	5776090491	191826	-9.5	4403297751	5776054277	9	4999.98
154312000	4403339469	5776083597	191835	-9.5	4403305000	5776047377	8	5000
154313000	4403346714	5776076703	191843	-9.5	4403312251	5776040478	9	4999.95
154314000	4403353959	5776069811	191852	-9.5	4403319502	5776033580	9	4999.97
154315000	4403361206	5776062920	191861	-9.5	4403326755	5776026684	9	4999.92
154316000	4403368454	5776056031	191870	-9.5	4403334009	5776019788	8	5000.01
154317000	4403375703	5776049142	191878	-9.5	4403341264	5776012894	9	4999.96
154318000	4403382954	5776042255	191887	-9.5	4403348521	5776006001	9	4999.98

⁽²⁾ La procedura è, in realtà, più complicata: infatti, il sistema di controllo degli organi di spostamento del binario deve tener conto, per quanto possibile, che quando si sposta una sezione di binario vengono movimentate, stante la rigidezza del binario, anche le sezioni prossime: quelle posteriori vengono rimosse dalla posizione corretta, quelle anteriori, all'atto della correzione, non sono più nella posizione di rilievo.

track and that detected topographically - except for instrumental errors: the advantages are:

⁽³⁾ The last figure both for the planimetric and the altimetry coordinates is rounded off to the mm tenth: in order to obtain the correct result values a regression must be performed on a number of subsequent values.

SCIENZA E TECNICA

Come si può notare le progressive sono distanziate di 1 m e per ogni sezione si dispone delle coordinate Est e Nord (in topografia equivalgono, rispettivamente, agli assi x ed y, di un riferimento cartesiano).

Con semplici operazioni⁽³⁾ si ricava, per ogni sezione, l'angolo di deviazione che - nell'esempio riportato - ricade nel IV quadrante ed è crescente con la progressiva. Trattasi, quindi, di un binario le cui progressive crescenti sono dirette verso Sud-Est ed in curva di raggio $R = 5976$ m; dalle quote risulta che la tratta è in livellata in ascesa con pendenza media dell'8,7% circa.

In definitiva, le misure geodetiche consentono - tramite il confronto tra la rappresentazione della geometria teorica del binario e quella rilevata topograficamente - di determinare, a meno degli errori strumentali, l'entità del difetto: i vantaggi sono:

- esatta determinazione della sezione misurata;
- accuratezza e ripetitività della misura;
- indipendenza dallo strumento di misura.

Viceversa il metodo presenta i limiti dovuti alla lentezza del procedimento di misura in linea che, dovendo essere eseguito sul binario, presume il suo fuori esercizio.

Inoltre, le misure sono fatte a binario scarico e, quindi, non nelle reali condizioni di esercizio.

La posa dei binari dell'AV - per ogni alzamento, ma escluso il finale di finitura - è stata appoggiata a correzioni topografiche: in tal senso si intende che il binario è stato posato su base assoluta.

Tale metodologia - anticipata nelle sue linee generali fin dal 1984 dagli Ing. FOCACCI e MONTANARI (premio MALLEGORI 1984 [Ingegneria Ferroviaria n. 9/86]) - ha trovato applicazione sulle linee AV italiane per l'intrinseca incapacità della correzione su base relativa (metodo Hallade e simili) ad eliminare i difetti di grande lunghezza d'onda, particolarmente nocivi per la qualità della marcia a velocità superiori⁽⁴⁾ ai 200 km/h.

2.2. Registrazioni con veicoli di misura

La registrazione delle misure di geometria con vettura - automotrice o rimorchiata - attrezzata con apposite

⁽³⁾ L'ultima cifra sia per le coordinate planimetriche che altimetriche è arrotondata al decimo di mm: per ottenere i valori derivati corretti occorre operare una regressione su più valori successivi.

⁽⁴⁾ Un veicolo - con una frequenza accoppiata bassa di circa 1 Hz - viaggiante a 200 km/h, "risuona" con un difetto di lunghezza d'onda

$$L = \frac{200}{3,6 \times 1} = 55,6 \text{ m}$$

Con la correzione Hallade, pur prescindendo che per raggi grandi (> 5000 m) l'errore di apprezzamento della freccia ($\frac{1}{2}$ mm) è pari al 5% della freccia teorica, le corde sono lunghe 20 m e, quindi, la correzione è insufficiente.

- the exact determination of the measured section;
- accuracy and repetitiveness of the measurement;
- independence from the measurement tool.

Vice versa il metodo ha limiti dovuti alla lentezza della misura in linea che, dovendo essere eseguito sul binario, presume il suo fuori esercizio.

Furthermore, the measures are taken on unloaded track and therefore not in the real operation conditions.

Laying the HS tracks was supported by topographic corrections – for each elevation but excluding the end finish: meaning in this sense that the track has been laid on an absolute base.

This method – foreseen in its general lines since 1984 by engineers FOCACCI and MONTANARI (MALLEGORI prize 1984 [Railway Engineering n. 9/86]) – was applied on the Italian HS lines due to the intrinsic correction inability to eliminate great wavelength defects (Hallade and similar methods), that are particularly harmful for the running quality at speeds exceeding⁽⁴⁾ 200 km/h.

2.2. Recordings with measurement vehicles

The recording of geometry measures through a vehicle – motor coach or trailer – equipped with specific instrumentation exceeds limitations due to the lentezza of the geodetic survey because the vehicles, at least the most recently built ones, can circulate – even on survey – at line speed – or little less – therefore not seriously hampering circulation.

Almost since the beginning of railway track operation, the geometry is measured with mobile means⁽⁵⁾ and in the past 135 years, methods have developed with the use of important modern technologies and with the use of increasingly sophisticated information analysis instruments.

The measures taken with measurement vehicles are called *measures on a relative basis* and the analysis of measured defects implies the knowledge of the geometric arrangement of the measurement equipment since it affects the measurement itself.

Fig. 2 that reports the measurement bogie of the his-

⁽⁴⁾ A vehicle – with a low coupled frequency of approximately 1 Hz – running at 200 km/h, "resounds" with a wavelength defect

$$L = \frac{200}{3,6 \times 1} = 55,6 \text{ m}$$

With the Hallade correction, although disregarding that for large radii (> 5000 m) the sag's estimation error ($\frac{1}{2}$ mm) is equal to 5% of the theoretic sag, the chords are 20 m long and therefore the correction is not sufficient.

⁽⁵⁾ It appears that the first construction of a control vehicle is ascribable to the German engineer W. GLAUSS who equipped a two axle vehicle in 1877 that was capable of measuring the effects of vertical defects, the gauge and the cant.

SCIENZA E TECNICA

strumentazioni supera le limitazioni dovute alla lentezza del rilievo geodetico perché i veicoli, almeno quelli di più recente costruzione, possono circolare - anche in rilievo - alla velocità di linea - o poco meno - non costituendo perciò gravoso intralcio alla circolazione.

Quasi dall'inizio dell'esercizio del binario ferroviario, la geometria è misurata con mezzi mobili⁽⁵⁾ e nei 135 anni passati i metodi si sono sviluppati con impiego di moderne tecnologie di rilievo e con impiego di strumenti di analisi dei dati sempre più sofisticati.

Le misure eseguite con veicolo di misura vengono chiamate *misure su base relativa* e l'analisi dei difetti misurati implica la conoscenza della disposizione geometrica degli apparecchi di prelievo della misura in quanto condizionanti la misura medesima.

Si esamina - come esempio - la fig. 2 che riporta il carrello esploratore della storica "carrozza di misura del binario" delle FS n° VV, 800.025, sulla quale era montata un'apparecchiatura di rilievo Amsler.

La carrozza, a due carrelli, uno a due assi, l'altro a tre, era stata ricavata, negli anni 1950, dalle Officine Materiale Rotabile di Firenze Porta a Prato, utilizzando una carrozza dell'"ex Treno Reale".

Il carrello a tre assi è il carrello esploratore: la distanza tra i suoi assi estremi è di 3,60 m: quello centrale è a metà del passo. Nello spazio compreso tra le due sale sono posti i palpatori per il rilievo del diagramma continuo delle "frecce" e dello scartamento. I difetti di livello longitudinale sono rilevati - per ciascuna fuga - come dislivello tra il centro della ruota dell'asse intermedio e la congiungente i centri degli assi estremi.

La carrozza rimodernata e denominata "Euclide" (fig. 3), è attualmente utilizzata - sulla Rete Ferroviaria Italiana - per le linee di minore importanza ed è attrezzata con lettori a laser per il rilievo del livello longitudinale e dell'allineamento.

La base attuale delle due grandezze è abbastanza lunga (18,647 m) ed il punto di misura è a m 13,157 da un estremo della base (misura asimmetrica). Con questa vettura - del peso di 516 kN, la velocità di rilievo è di 100 km/h.

Una carrozza analoga, ma più moderna, è la "Talete" (fig. 4), a tre carrelli Minden Deutz a due assi. Anche questa vettura misura le grandezze di livello longitudinale e di allineamento mediante base sufficientemente lunga e misura asimmetrica. Con questa vettura, del peso di 540 kN, la velocità di rilievo è di 160 km/h.

Ambidue le attrezzature citate, che misurano anche

⁽⁵⁾ Sembra che una prima realizzazione di un veicolo di controllo si debba all'ingegnere tedesco W. GLAUSS che equipaggiò, nel 1877, un veicolo a due assi il quale riusciva a misurare gli effetti dei difetti verticali, lo scartamento e la sopraelevazione.

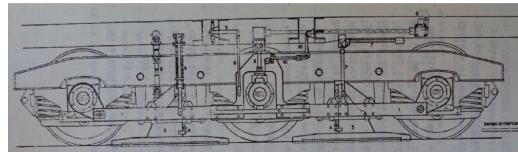


Fig. 2 - Carrello di misura della carrozza VV 025. Measurement bogie of the VV 025 Carriage.

torical "track measurement carriage" of the FS n° VV, 800.025 is taken as an example, on which the Amsler survey equipment was fitted.

The two bogie carriage, one with two axles and the other with three, was made in the 50's by the Officine Materiale Rotabile di Firenze Porta a Prato, using one of the "ex Royal Train" carriages.

The three axles bogie is the measurement bogie: the distance between its end axles is of 3,60 m: the middle one is placed halfway of the bogie wheelbase. In the space included within the two wheel sets there are the detector probes of the continuous "sags" diagram and of the gauge. The longitudinal level defects are detected - for each rail stretch - as difference in height between the centre of the intermediate axle wheel and the ideal line joining the centre of the end axles.

The modernised carriage called "Euclide" (fig. 3), is currently used - on the Italian Railway Network - for less important lines and it is fitted with laser readers for the detection of the longitudinal and alignment level.

The current base of the two quantities is quite long (18,647 m) and the measurement point is at 13,157 metres from one end of the base (asymmetric measure). With this carriage weighing 516 kN, the speed measurement is 100 km/hr.

A similar but more modern carriage is the "Talete" one (fig. 4), with three Minden Deutz 2 axle bogies. This carriage also measures the longitudinal and alignment level sizes through a sufficiently long base and asymmetric measure. With this carriage weighing 540 kN, the speed measurement is 160 km/hr.

Both of the pieces of equipment mentioned, that also measure the transversal level, the track distortion, the gauge and track wear, record the alignment and the longi-



Fig. 3 - La carrozza Euclide. The Euclide carriage.

SCIENZA E TECNICA



Fig. 4 - La carrozza Talete. *The Talete carriage.*

livello trasversale, sgombro, scartamento ed usura della rotaia, registrano l'allineamento ed il livello longitudinale con lettori ottici.

Le registrazioni sono riportate, in funzione della distanza esplorata mediante una ruota fonica; pertanto, la successione di valori che rappresentano la misura è in funzione dello sviluppo s della traiettoria percorsa.

I dati - digitalizzati e trasmessi per via elettrica - sono acquisiti da un calcolatore di bordo e trattati per una immediata lettura a video e registrati in appositi data-base per successive elaborazioni.

Nella fig. 5 è riportato lo schema di un carrello rilevatore.

Con tale attrezzatura meccanica la misura è ottenuta rilevando lo spostamento dell'asse intermedio rispetto al telaio collegato rigidamente agli assi estremi distanti a e b ; posto Y_a il difetto in A, Y_c il difetto in C, Y_b il difetto in B, detta d la distanza tra il telaio rigido e la parallela al tracciato teorico in C si ottiene, dalla proporzionalità,

$$d = \frac{b}{a+b} (Y_b - Y_a).$$

La misura è m , ossia la distanza tra telaio e centro della ruota.

Dalla espressione $d+m+Y_c=Y_b$ si ottiene la relazione tra misura m e difetto in C, ossia

$$m = Y_a - \frac{b}{a+b} + Y_b - \frac{a}{a+b} - Y_c.$$

Quindi se il difetto è descritto lungo s da una funzione $f(s)$, la misura vale

$$m(s) = -f(s) + \beta f(s-a) + \alpha f(s+b)$$

Dalla espressione data si osserva che la misura non rappresenta direttamente il difetto per la presenza dei termini

$$\beta f(s-a) \text{ ed } \alpha f(s+b).$$

I vantaggi delle misurazioni con tali apparecchiature sono la velocità di rilievo e la misura sotto carico. Per converso i limiti sono quelli insiti - come di seguito si dirà - nelle misure su base relativa.

tudinal level through optical readers.

The recordings are reported according to the distance explored through a tone wheel; therefore, the series of values that represent the measure is according to the "s" development of the path run.

The information - that is digitalised and transmitted electrically - is acquired by an on-board computer and processed for immediate display reading and recorded in specific data-bases for subsequent processings.

Fig. 5 represents the diagram of a detector bogie.

With such mechanical equipment, measurement is done by detecting the movement of the intermediate axle with respect to the frame rigidly connected to the end axles that are distant a and b; given Y_a the defect in A, Y_c the defect in C, Y_b the defect in B, called d, the distance between the rigid frame and the parallel to the theoretic layout in C, from the proportionality we obtain,

$$d = \frac{b}{a+b} (Y_b - Y_a).$$

The measurement is m , that is the distance between the frame and the centre of the wheel.

Through the expression $d+m+Y_c=Y_b$ the relation between measure m and defect in C is obtained, that is

$$m = Y_a - \frac{b}{a+b} + Y_b - \frac{a}{a+b} - Y_c.$$

Therefore if the defect is described as along s by an $f(s)$ function, the value of the measure is

$$m(s) = -f(s) + \beta f(s-a) + \alpha f(s+b)$$

From the expression given one can see that the measure does not represent the defect directly, due to the presence of the terms

$$\beta f(s-a) \text{ ed } \alpha f(s+b).$$

The advantages of measurements performed with such equipment are the speed of the detection and the measurement under load. Conversely, the limits are those inherent to the measures on a relative basis - as will be said further on.

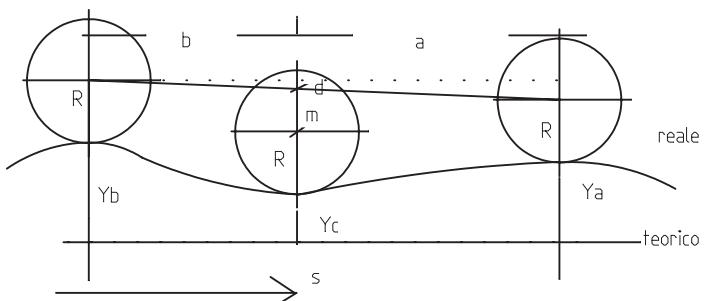


Fig. 5 - Schema di un carrello di misura. *Measurement bogie diagram.*

SCIENZA E TECNICA

2.3. Vettura con base di misura fittizia

L'ultimo gruppo di tecniche di misura della geometria del binario è quello del rilievo delle *accelerazioni a bordo* del veicolo.

Se si impianta a bordo del veicolo di misura un riferimento inerziale (accelerometri o giroscopi) si può valutare lo spostamento di un corpo di riferimento - la cassa della vettura, per e.s. - rispetto ad un sistema di assi inerziali immobili.

Tale criterio era quello degli originali "apparecchi registratori Hallade" impiegati in FS a partire dal 1926 a bordo di ordinarie carrozze in circolazione. Nel 1932 uno di questi apparecchi fu montato su una apposita carrozza che, denominata "Carrozza controllo binari", fu la prima ad essere impiegata in Italia.

Il principio del sistema inerziale, negli "Hallade" trovava applicazione in un pendolo con piano di oscillazione in senso longitudinale del veicolo che misurava le accelerazioni longitudinali; in un secondo pendolo con piano di oscillazione trasversale per la misura delle accelerazioni trasversali: da esse si poteva risalire ai difetti di frecciatura e di sopraelevazione; un terzo pendolo, sempre con piano di oscillazione longitudinale ma con sospensione mantenuta orizzontale, era usato per la misura delle accelerazioni verticali dovute ai difetti di livello longitudinale ("salti").

Ulteriori sviluppi di tali apparecchiature sono stati quelli delle c.d. carrozze inerziali: di fatto queste rispondono alla terza categoria segnalata cioè quella di determinare i difetti sugli effetti che essi hanno sul veicolo.

E' interessante ricordare che giroscopi sono montati a bordo dei veicoli ad assetto variabile forzato (Pendolini) e servono a scoprire l'inizio e la fine delle curve per i necessari comandi sugli attuatori di assetto cassa.

Anche tali sistemi hanno i vantaggi della elevata velocità di rilievo ma forniscono gli effetti della difettosità: per risalire all'entità del difetto, che ha generato la perturbazione, dovrebbe essere nota la funzione di trasferimento che, in un veicolo complesso a più gradi di libertà ed a sospensioni con caratteristiche meccaniche non lineari non è di immediata e sicura formulazione.

3. Misure su base relativa

Per quanto detto in 2.2, quando si eseguono misure su base relativa, la misura che l'apparecchiatura fornisce non è la misura vera del difetto ma la sua immagine.

Quindi tra grandezza a terra e misura sussiste una relazione funzionale che viene chiamata *funzione di trasferimento*.

Peraltro, nella grandezza rilevata, oltre al difetto, è presente la componente dovuta alla traiettoria percorsa dalla base.

2.3. Carriages with fictitious measurement basis

The last group of measurement techniques of the track geometry is that concerning the detection of *accelerations on board* the vehicle.

If an inertial reference is set up on board the measurement carriage (accelerometers or gyroscopes) the movement of a reference body can be assessed – the carriage body, for example – compared to a system with motionless inertial axle.

Such criteria was the original "Hallade recording equipment" one, used in FS as of 1926 on board ordinary carriages circulating. In 1932 one of these pieces of equipment was fitted on a specific carriage, called "Track control carriage", that was the first to be used in Italy.

The inertial system principle in the "Hallades" was applied to a pendulum with a oscillation plane placed in a longitudinal direction of the carriage that measured longitudinal accelerations; to a second pendulum with a transversal oscillation plane for the measurement of the transversal accelerations: from these, one could go back to the sag and cant defects; a third pendulum with a longitudinal oscillation plane but with a horizontal suspension, was used for the measurement of vertical accelerations caused by the longitudinal level defects ("jumps").

Further developments of such equipment were those of the so-called inertial carriages: in fact, these correspond to the third category mentioned, that is for the determination of defects on the effects that they have on the carriage.

It is worth remembering that the gyroscopes are fitted on board the carriage via a variable forced trim (small Pendulum) and are necessary to find out the beginning and the end of the curves for the necessary commands on the body trim actuators.

These systems also have the advantages of a very fast detection but they give the effects of defectiveness: in order to go back to the size of the defect that has generated the disturbance, the transfer function should be known that cannot be immediately framed in a complex carriage with several degrees of freedom and with suspensions with non-linear mechanical features.

3. Measurements on a relative basis

With regards to what has been said in 2.2, when measures are taken on a relative basis, the measurement that the equipment gives is not the real defect one but its image.

Therefore there is a functional relation called *transfer function* between ground size and measure.

Furthermore, besides the defect, the component due to the path run from the base, is in the size detected.

Let us consider for example that the base measure runs a *circular path* without defects (fig. 6).

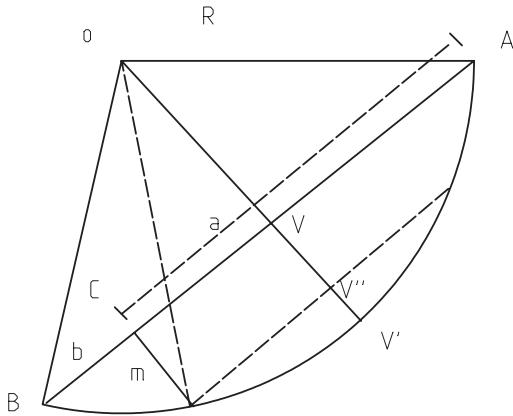


Fig. 6 - Misura di una traiettoria circolare. Circular path measure.

Consideriamo, ad esempio, che la base di misura percorra una *traiettoria circolare* esente da difetti (fig. 6).

Misurando con un'asta AB, con il cursore misuratore in C, la misura m vale $m = VV' - V''V'$

Essendo

$$VV' = R(1 - \cos \frac{a+b}{2R}) \quad V''V' = R(1 - \cos \frac{a-b}{2R})$$

$$m = 2R \operatorname{sen} \frac{a}{2R} \operatorname{sen} \frac{b}{2R}$$

cioè un valore costante su tutto lo sviluppo.

Essendo $a << 2R$ e $b << 2R$ si può scrivere

$$m = \frac{ab}{2R}$$

Quindi la misura su una traiettoria circolare è una costante proporzionale ad $1/R$ tramite $ab/2$.

Consideriamo ora una *traiettoria parabolica* (fig. 7).

Per le particolari curve denominate "raccordi parabolici", la curva di tracciamento è una parabola cubica con ascissa sulla tangente di ingresso (cioè del tipo $y = Ax^3$) ottenuta come approssimazione di una clostoide (curva geometrica per la quale la curvatura varia linearmente con lo sviluppo). Poiché, dopo il tracciamento e la prima posa del binario, la definitiva correzione è eseguita sugli sviluppi fornendo incrementi, o decrementi, costanti di "frecce", si ha che, a binario finito, la curva in opera è effettivamente una clostoide⁽⁶⁾.

⁽⁶⁾ Per la verità la scansione è per lunghezze costanti di corda e non per archi di circonferenza: ma la differenza è del tutto trascurabile essendo lo sviluppo s per una assegnata corda c,

$$s = 2R \operatorname{arcsen} \frac{c}{2R}$$

che con $R \gg c$ diventa $s \approx c$.

Measuring AB with a pole, with the measuring cursor in C, the value of the m measure is $m = VV' - V''V'$

being

$$VV' = R(1 - \cos \frac{a+b}{2R}) \quad V''V' = R(1 - \cos \frac{a-b}{2R})$$

$$m = 2R \operatorname{sen} \frac{a}{2R} \operatorname{sen} \frac{b}{2R}$$

that is a constant value on all the development.

Being $a << 2R$ and $b << 2R$ one can write

$$m = \frac{ab}{2R}$$

Therefore the measure on a circular path is a proportional constant at $1/R$ through $ab/2$.

Now let us consider a *parabolic path* (fig. 7).

For particular curves called "parabolic transition curves", the layout curve is a cubic intersection with axis on the entry tangent (that is a $y = Ax^3$ type) achieved as approximation of a clostoide (geometric curve for which the curvature varies linearly with development). Since, the final correction is performed on the developments giving constant increases or decreases of "sags", after the layout and the first track laying, upon completion of the track, the curve casting is actually a clostoide⁽⁶⁾.

Let us fix a mobile reference system along s having origin in S and tangent at the curve.

We write down the curve, in the given reference, as a Taylor development: for the two Y_a and Y_b ordinates we will have, where the 0 subscript is the value calculated on the actual axis:

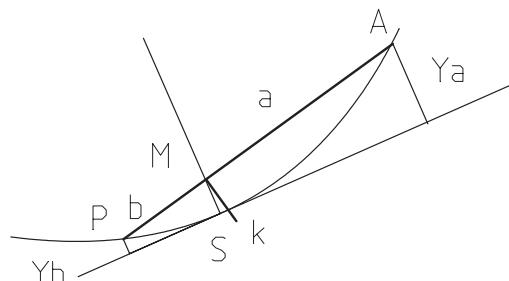


Fig. 7 - Misura di una traiettoria parabolica. Parabolic path measurement.

⁽⁶⁾ To be honest the scan is for constant lengths of chord and not for circumference arcs: but the difference is insignificant being the s development for an assigned c chord,

$$s = 2R \operatorname{arcsen} \frac{c}{2R}$$

that with $R \gg c$ becomes $s \approx c$.

SCIENZA E TECNICA

Fissiamo un sistema di riferimento mobile lungo s, con origine posta in S, e tangente alla curva.

Scriviamo la curva, nel dato riferimento, come uno sviluppo di Taylor: per le due ordinate Y_a ed Y_b si avrà, dove con il pedice 0 si intende il valore calcolato sulla ascissa corrente:

in avanti

$$Y_a = Y_0 + Y'_0 a + Y''_0 \frac{a^2}{2} + Y'''_0 \frac{a^3}{3!} + \dots$$

in dietro

$$Y_b = Y_0 - Y'_0 b + Y''_0 \frac{b^2}{2} - Y'''_0 \frac{b^3}{3!} + \dots$$

Il segmento MS vale

$$\bar{y} = \frac{b}{a+b} Y_a + \frac{a}{a+b} Y_b$$

ossia

$$\bar{y} = \beta Y_a + \alpha Y_b;$$

la misura, che è pari al segmento MK, viene fornita da

$$m = \frac{\bar{y}}{\cos \alpha}$$

essendo α l'inclinazione dell'asta rispetto al sistema di riferimento: detto angolo sarà

$$\alpha = \arcsen \frac{Y_a - Y_b}{a + b}$$

Ora, la derivata seconda di una cloioide

$$y(s) = \frac{k}{6} s^3$$

(cioè di quella curva per la quale - come detto - la curvatura cresce linearmente con lo sviluppo), nel riferimento curvilineo in s, è data da ks essendo k la derivata terza e nulle le derivate di ordine superiore al terzo. I valori Y_0 ed Y'_0 , sono nulli per costruzione.

Pertanto si deve avere

in avanti

$$Y_a = Y''_0 \frac{a^2}{2} + Y'''_0 \frac{a^3}{3!}$$

indietro

$$Y_b = Y''_0 \frac{b^2}{2} - Y'''_0 \frac{b^3}{3!}$$

ossia

in avanti

$$Y_a = ks \frac{a^2}{2} + k \frac{a^3}{3!} \dots$$

indietro

$$Y_b = ks \frac{b^2}{2} - k \frac{b^3}{3!}$$

forwards

$$Y_a = Y_0 + Y'_0 a + Y''_0 \frac{a^2}{2} + Y'''_0 \frac{a^3}{3!} + \dots$$

backwards

$$Y_b = Y_0 - Y'_0 b + Y''_0 \frac{b^2}{2} - Y'''_0 \frac{b^3}{3!} + \dots$$

The MS segment value is

$$\bar{y} = \frac{b}{a+b} Y_a + \frac{a}{a+b} Y_b$$

that is to say

$$\bar{y} = \beta Y_a + \alpha Y_b;$$

the measure, that is equal to the MK segment, is given by

$$m = \frac{\bar{y}}{\cos \alpha}$$

being α the inclinazione of the bar with respect to the reference system: such angle will be

$$\alpha = \arcsen \frac{Y_a - Y_b}{a + b}$$

Now, the second derivative of a cloioide

$$y(s) = \frac{k}{6} s^3$$

(that is of the curve for which – as we have said – the curvature increases linearly with the development), in the curvilinear reference in s, is given by is being k the third derivative and the derivatives over the third null. Values Y_0 and Y'_0 , are null by construction.

Therefore one must have

forwards

$$Y_a = Y''_0 \frac{a^2}{2} + Y'''_0 \frac{a^3}{3!}$$

backwards

$$Y_b = Y''_0 \frac{b^2}{2} - Y'''_0 \frac{b^3}{3!}$$

that is

forwards

$$Y_a = ks \frac{a^2}{2} + k \frac{a^3}{3!} \dots$$

backwards

$$Y_b = ks \frac{b^2}{2} - k \frac{b^3}{3!}$$

The MS segment value is

$$\bar{y} = \beta Y_a + \alpha Y_b = \frac{k}{2} \left(\beta a^2 [s + \frac{a}{3}] + \alpha b^2 [s - \frac{b}{3}] \right);$$

the bar inclination value compared to the reference system is

SCIENZA E TECNICA

Il segmento MS vale

$$\bar{y} = \beta Y_a + \alpha Y_b = \frac{k}{2} \left(\beta a^2 \left[s + \frac{a}{3} \right] + \alpha b^2 \left[s - \frac{b}{3} \right] \right);$$

l'inclinazione dell'asta rispetto al sistema di riferimento vale

$$\alpha = \arcsen \frac{Y_a - Y_b}{a+b} = \arcsen \left(\frac{k \left(ba^2 \left[s + \frac{a}{3} \right] - ab^2 \left[s - \frac{b}{3} \right] \right)}{2(a+b)^2} \right)$$

Si osserva, che solo quando $a = b$, l'angolo $\alpha = 0$ e la misura vale

$$m = \bar{y} = \frac{k}{2} a^2 s$$

ed è direttamente proporzionale, per il tramite del fattore costante $a^2/2$, alla curvatura che è, come detto, ks .

Per quanto sopra, una traiettoria costituita da un trattato di circonferenza, raccordata o meno, agli estremi da raccordi parabolici, salvo le discontinuità là dove cambia l'ordine della curva, fornisce un trapezio, oppure un rettangolo, di altezza la curvatura della circonferenza moltiplicato per un fattore costante $1/2 ab$.

La fig. 8 rappresenta una registrazione di allineamento eseguita con base 4+3 m, di una curva di raggio 300 m, raccordata in ingresso da un R.P. di 30 m di lunghezza. All'uscita si ha tangente diretta cerchio/rettifilo.

$$\alpha = \arcsen \frac{Y_a - Y_b}{a+b} = \arcsen \left(\frac{k \left(ba^2 \left[s + \frac{a}{3} \right] - ab^2 \left[s - \frac{b}{3} \right] \right)}{2(a+b)^2} \right)$$

One can observe that, only when $a = b$, angle $\alpha = 0$ and the measure value is

$$m = \bar{y} = \frac{k}{2} a^2 s$$

and it is directly proportional to the curvature that is ks , as has been said, through the constant $a^2/2$ factor.

With regards to the above, a path consisting of a circumference stretch, whether jointed or not to the ends with parabolic transition curves, except for discontinuities where the curve order changes, gives a trapezium or a rectangle whose height is equal to the circumference curvature multiplied by a $1/2 ab$ constant factor.

Fig. 8 represents an alignment recording performed with 4+3 m base, of a curve having a radius of 300m, with a 30 m long entry parabolic transition. The output has a circle/straight stretch direct tangent.

The full circumference measure is

$$m = \frac{1}{2} ab \frac{1}{R} = \frac{4 \times 3}{2} \frac{1}{300} = 0,02 \text{ m}$$

The increasing trend of the measure on the parabolic transition and the sharp fall in correspondence of the di-

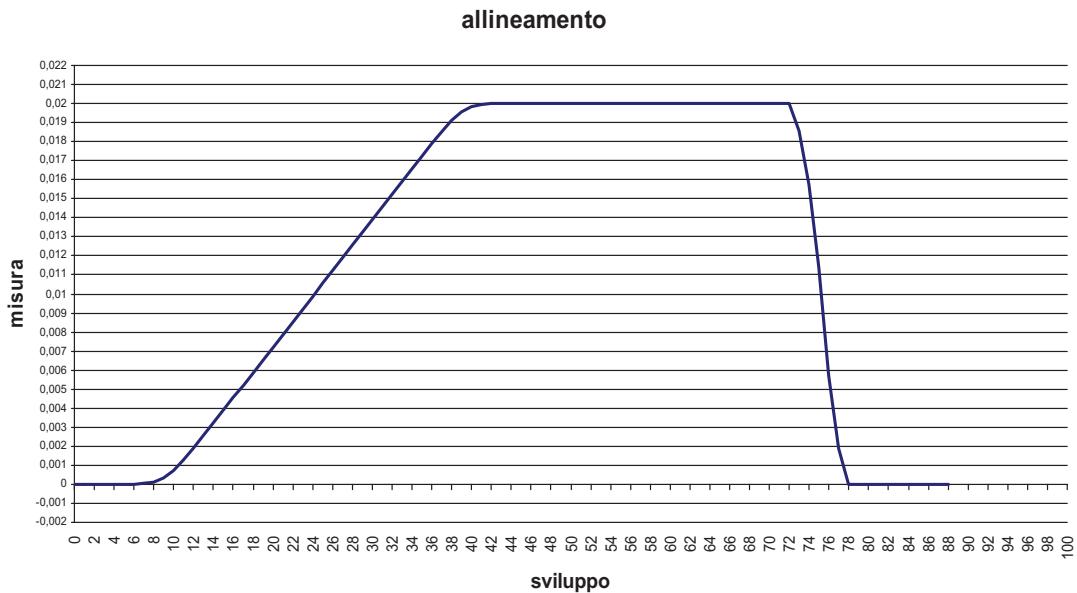


Fig. 8 - Registrazione di "allineamento". "Alignment" recording.

SCIENZA E TECNICA

La misura in piena circonferenza è

$$m = \frac{1}{2} ab \frac{1}{R} = \frac{4 \times 3}{2} \frac{1}{300} = 0,02 \text{ m}$$

Si osserva l'andamento crescente della misura sul R.P. e la brusca caduta in corrispondenza della tangente diretta.

Le semplici considerazioni geometriche portano l'attenzione sulla funzione di trasferimento del sistema di misura.

Infatti, la trasformazione di $d(s)$, funzione del difetto nello spazio, in un altro segnale $m(s)$, sempre funzione dello spazio, viene espressa da una funzione che lega la misura al segnale reale.

Chiamando H questa funzione, si può cioè scrivere $m(s) = H[d(s)]$.

Se la funzione $d(s)$ è di tipo algebrico e continua, si è visto che la riproduzione $m(s)$ è - con ottima approssimazione - la curvatura della funzione $d(s)$ medesima, moltiplicata per un fattore funzione dell'apparecchiatura. Dunque, in tal caso la funzione di trasferimento è

$$H(s) = h \frac{d''(s)}{d(s)}.$$

Quando, però, la funzione $d(s)$ non è algebrica (p.es. sinusoidale) non è altrettanto possibile esprimere la funzione di trasferimento come semplice rapporto tra la curvatura della traiettoria e la traiettoria stessa.

Infatti, la derivata seconda di un seno (oppure di un coseno) ha la stessa forma della funzione moltiplicata per il quadrato della pulsazione, per cui la funzione diventa

$$H(s) = -h \Omega^2,$$

costante lungo s .

Essendo, ora, il tracciato in registrazione una combinazione di funzioni algebriche e di trigonometriche (la difettosità⁽⁷⁾) la mancanza di una funzione di trasferimento univoca e generalizzata pone, come vedremo, qualche difficoltà quando si debba risalire dalla registrazione alla interpretazione della difettosità.

Analizziamo, pertanto, una traiettoria funzione coseno oppure seno, o una combinazione di tali funzioni anche tra loro in fase diversa: la base di misura inizie la registrazione insistendo del tutto su tale tipo di traiettoria.

Sia il difetto con andamento rappresentato da una funzione trigonometrica qualsiasi di ampiezza D e lunghezza d'onda λ (pulsazione $\omega = 2\pi/\lambda$).

Ricordando la formula

$$m(s) = -f(s) + \beta f(s-a) + \alpha f(s+b)$$

⁽⁷⁾ Non è ipotizzabile una difettosità che abbia una forma diversa da seni e coseni: altrimenti si avrebbero funzioni espansive (dovute a difetti crescenti con sistematicità) poco realistiche quando il binario, come nella realtà, è contenuto in ristretti limiti di spazio (sede, profilo minimo ostacoli, p.es.).

rect tangent can be observed.

The plain geometric considerations bring the attention on the transfer function of the measurement system.

In fact, the transformation of $d(s)$, the space defect function, into another signal $m(s)$, that is still a space function, is expressed by a function that links the measure to the real signal.

By calling this function H , one can therefore write $m(s) = H[d(s)]$.

If the $d(s)$ function is an algebraic and continuous type one, we have seen that the $m(s)$ reproduction - with an excellent approximation - is the curvature of the $d(s)$ function itself, multiplied by an equipment function factor. Therefore, in such case the transfer function is

$$H(s) = h \frac{d''(s)}{d(s)}.$$

However, when the $d(s)$ function is not algebraic (e.g. sinusoidal) it is not likewise possible to express the transfer function as simple relation between the curvature of the path and the path itself.

In fact, the second derivative of a sine (or of a cosine) has the same form as the function multiplied by the squared pulsation, therefore the function becomes

$$H(s) = -h \Omega^2,$$

constant along s .

Now being the recorded layout a combination of algebraic and trigonometric functions (the defectiveness⁽⁷⁾) the lack of an unambiguous and generalised transfer function creates some difficulty, as we will see, when one has to go back from the recording to the interpretation of the defectiveness.

Therefore, let us analyse a cosine or sine function path, or a combination of such functions even between them in a different phase: the measurement base starts recording fully insisting on such type of path.

Let the defect trend be represented by any trigonometric function with a D magnitude and λ wave length (pulsation $\omega = 2\pi/\lambda$).

Bearing in mind the formula

$$m(s) = -f(s) + \beta f(s-a) + \alpha f(s+b)$$

and putting

$$f(s) = D e^{-j\omega s}$$

⁽⁷⁾ A defectiveness with a shape different to sines and cosines is not presumable: we would otherwise have expansive functions (due to the defects increasing systematically) hardly realistic when the track is contained in restricted spaces, as they actually is, (e.g. track bed, minimum obstacle profile).

SCIENZA E TECNICA

e ponendo

$$f(s) = D e^{-j\omega s}$$

si ha

$$m(s) = D[-e^{-j\omega s} + \beta e^{-j\omega(s-a)} + \alpha e^{-j\omega(s+b)}]$$

Il rapporto tra la misura e la grandezza vale

$$\begin{aligned} H(\omega) &= \frac{m(s)}{f(s)} = -1 + \beta e^{j\omega a} + \alpha e^{-j\omega b} = -1 + \\ &+ \frac{b}{a+b} \cos \omega a + \frac{a}{a+b} \cos \omega b + \\ &+ j \left(\frac{b}{a+b} \sin \omega a - \frac{a}{a+b} \sin \omega b \right) \end{aligned}$$

ed è invariante con l'ascissa s e funzione soltanto delle caratteristiche geometriche della base di misura e della lunghezza d'onda della - o delle - funzioni trigonometriche.

Evidentemente per $a = b = c$ la funzione di trasferimento perde il termine immaginario e diventa una semplice funzione reale

$$H(\omega) = [\cos \omega c - 1].$$

La funzione complessa $H(\omega)$ viene, convenientemente, rappresentata in diagrammi di Bode distinguendo il modulo e la fase, in scale semilogaritmiche.

L'asse delle ascisse è nelle pulsazioni ω , ma con un artificio grafico, possono essere riportate le lunghezze d'onda per una più immediata lettura del grafico. La scala è logaritmica, per avere una più ampia rappresentazione.

Detti, ora, $M(\omega)$ il modulo del difetto di pulsazione ω e $\varphi(\omega)$ la sua fase, si ha che il modulo e la fase della misura saranno

$$M(\omega) = |D(\omega)| |H(\omega)|$$

$$\varphi(\omega)_m = \varphi(\omega) + \varphi(\omega)_{FT}$$

Allora, nell'ipotesi - per semplicità - che il difetto coseño abbia inizio in $s = 0$, si ha la rappresentazione della misura lungo s

$$(ms, \omega) = D(\omega)H(\omega)\cos(\omega s + \varphi(\omega)_{FT}) = D(\omega)\cos\omega\left(s + \frac{\varphi(\omega)_{FT}}{\omega}\right)$$

dove il secondo termine in parentesi esprime il ritardo tra difetto e misura.

3.1. Misura con vettura tradizionale

Se disegniamo la Funzione di Trasferimento di una carrozza di rilievo, per es. la Talete, (fig. 9), che è caratterizzata - per il livello longitudinale - da

a	10,157 m
b	7,812 m
a+b	17,969 m
beta	0,435
alfa	0,565

one has

$$m(s) = D[-e^{-j\omega s} + \beta e^{-j\omega(s-a)} + \alpha e^{-j\omega(s+b)}]$$

The relation between measure and magnitude is

$$\begin{aligned} H(\omega) &= \frac{m(s)}{f(s)} = -1 + \beta e^{j\omega a} + \alpha e^{-j\omega b} = -1 + \\ &+ \frac{b}{a+b} \cos \omega a + \frac{a}{a+b} \cos \omega b + \\ &+ j \left(\frac{b}{a+b} \sin \omega a - \frac{a}{a+b} \sin \omega b \right) \end{aligned}$$

and does not vary with the s axis and is only a function of the geometric characteristics of the measurement basis and of the wavelength of the trigonometric functions.

The transfer function obviously loses the imaginary term for $a = b = c$ and becomes a simple real function.

$$H(\omega) = [\cos \omega c - 1].$$

The complex $H(\omega)$ function is conveniently represented in Bode diagrams distinguishing the module and the phase, in semi-logarithmic scales.

The pulsations ω are represented over the axis of abscissas but, with a graphical mechanism, the wavelengths can be reported for more immediate reading of the graph. The scale is logarithmic so as to have a broader representation.

Now having named $M(\omega)$ the w pulsation defect module and $j(\omega)$ its phase, the result is that the module and the measure phase will be

$$\begin{aligned} M(\omega) &= |D(\omega)| |H(\omega)| \\ \varphi(\omega)_m &= \varphi(\omega) + \varphi(\omega)_{FT} \end{aligned}$$

Now - for the sake of straightforwardness - assuming that the cosine defect starts in $s = 0$, one has the representation of the measure along s

$$(ms, \omega) = D(\omega)H(\omega)\cos\left(\omega s + \varphi(\omega)_{FT}\right) = D(\omega)\cos\omega\left(s + \frac{\varphi(\omega)_{FT}}{\omega}\right)$$

where the second term in brackets expresses the delay between defect and measure.

3.1. Measurement with a traditional carriage

If we draw the Transfer Function of a survey carriage, e.g. the Talete one, (fig. 9), that is characterised - due to the longitudinal level - by

a	10,157 m
b	7,812 m
a+b	17,969 m
beta	0,435
alfa	0,565

SCIENZA E TECNICA

Abbiamo: per il modulo - *We have: for the module:*



e per il ritardo - *and for the delay:*

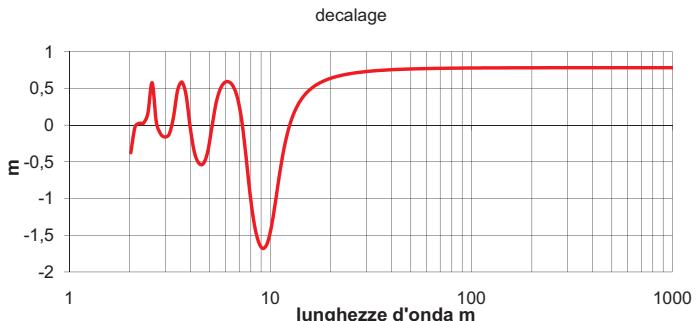


Fig. 9 - Funzione di trasferimento della carrozza Talete – livello longitudinale. Transfer function of the Talete carriage – longitudinal level.

In ragione di quanto detto, risulta che se la traiettoria è una trigonometrica con una lunghezza d'onda di 20 m, l'immagine avrà una ampiezza amplificata di 1,9 volte ed apparirà per

$$r = \frac{\varphi(\omega)_{FT}}{\omega}$$

cioè con un ritardo⁽⁸⁾ di 0,638 m; una traiettoria con lunghezza d'onda 200 m,

avrà una ampiezza pari a 0,0389 dell'ampiezza della traiettoria; il ritardo⁽⁹⁾ sarà 0,781 m; si osservi come l'apparecchiatura minimizzi, al variare della lunghezza , il decalage ma come sia estremamente sensibile nell'ampiezza.

⁽⁸⁾ Evidentemente se la carrozza viaggia in senso inverso il ritardo diventa anticipo: è, quindi, necessario che la registrazione sia corredata dell'informazione se la marcia è normale o a "ritroso".

⁽⁹⁾ Dalla funzione che esprime la fase della funzione di trasferimento si ottiene che per ω tendente a 0, il rapporto

$$r = \frac{\varphi(\omega)_{FT}}{\omega}$$

Because of what has been said, it turns out that if the path is trigonometric with a 20 m wavelength, the image will have a magnitude amplified 1.9 times and will appear for

$$r = \frac{\varphi(\omega)_{FT}}{\omega}$$

that is with a delay⁽⁸⁾ of 0,638 m; a path having a wavelength of 200 m, will have a magnitude equal to 0,0389 of the path's magnitude; the delay⁽⁹⁾ will be 0,781 m; it should be noticed how the equipment minimizes the discrepancy as the length varies, but how it is extremely sensible in magnitude.

If the measure basis were symmetric (and with a total length of 2 c) the FT becomes

$$FT = -1 + e^{-j\omega b} + e^{j\omega a} = FT = -1 + e^{-j\omega \frac{c}{2}} + e^{j\omega \frac{c}{2}}$$

$$= \text{therefore } FT = -1 + \cos c$$

⁽⁸⁾ Evidently if the carriage travels in reverse direction, the delay becomes ahead of time: it is therefore necessary to provide the recording with the information, if it is normal travel or "backwards".

⁽⁹⁾ From the function expressing the transfer function phase one obtains that for ω tending towards 0, the relation

$$r = \frac{\varphi(\omega)_{FT}}{\omega}$$

tends towards 1/3 (b-a). In fact, with the arguments of the trigonometric functions close to 0, one can write

$$\begin{aligned} r &= \frac{1}{\omega} \arctan \frac{\frac{b}{a+b} \sin \omega a - \frac{a}{a+b} \sin \omega b}{-1 + \frac{b}{a+b} \cos \omega a + \frac{a}{a+b} \cos \omega b} \approx \\ &\approx \frac{1}{\omega} \arctan \frac{\frac{b}{a+b} \left(\omega a - \frac{\omega^3 a^3}{3!} + \dots \right) - \frac{a}{a+b} \left(\omega b - \frac{\omega^3 b^3}{3!} + \dots \right)}{-1 + \frac{b}{a+b} \left(1 - \frac{\omega^2 a^2}{2} + \dots \right) + \frac{a}{a+b} \left(1 - \frac{\omega^2 b^2}{2} + \dots \right)} = \\ &= \frac{1}{\omega} \arctan \frac{\frac{1}{3!} (-\omega^3 a^3 b + \omega^3 b^3 a)}{\frac{1}{2} (-\omega^2 a^2 b - \omega^2 b^2 a)} \end{aligned}$$

SCIENZA E TECNICA

Se la base di misura fosse simmetrica (e di lunghezza totale 2 c) la FT diventa

$$FT = -1 + e^{-j\omega b} + e^{j\omega a} = FT = -1 + e^{-j\frac{\omega c}{2}} + e^{j\frac{\omega c}{2}}$$

= quindi $FT = -1 + \cos \omega c$

e tale funzione si annulla per

$$l.d.o. = c; \frac{c}{2}; \frac{c}{3}; \dots \text{ (10)}$$

[l.d.o. = lunghezza d'onda] e raddoppia per

$$l.d.o. = 2c; \frac{2c}{3}; \frac{2c}{5}; \dots .$$

Allora, la maggiore l.d.o. oltre la quale la misura non assume valori nulli è c.

Quando, invece, il punto di misura non è centrato si ha, sviluppando il modulo della funzione di trasferimento:

$$\begin{aligned} M = & \sqrt{\left(-1 + \frac{b}{a+b} \cos \omega a + \frac{a}{a+b} \cos \omega b \right)^2 +} \\ & + \left(\frac{b}{a+b} \sin \omega a - \frac{a}{a+b} \sin \omega b \right)^2 \end{aligned}$$

Affinché $M = 0$ deve essere contemporaneamente, ipotizzando $a > b$,

tende a $1/3$ (b-a). Infatti, con gli argomenti delle trigonometriche prossimi allo 0, si può scrivere

$$\begin{aligned} r = & \frac{1}{\omega} \arctan \frac{\frac{b}{a+b} \sin \omega a - \frac{a}{a+b} \sin \omega b}{-1 + \frac{b}{a+b} \cos \omega a + \frac{a}{a+b} \cos \omega b} \approx \\ & \approx \frac{1}{\omega} \arctan \frac{\frac{b}{a+b} \left(\omega a - \frac{\omega^3 a^3}{3!} + \dots \right) - \frac{a}{a+b} \left(\omega b - \frac{\omega^3 b^3}{3!} + \dots \right)}{-1 + \frac{b}{a+b} \left(1 - \frac{\omega^2 a^2}{2} + \dots \right) + \frac{a}{a+b} \left(1 - \frac{\omega^2 b^2}{2} + \dots \right)} \\ = & \frac{1}{\omega} \arctan \frac{\frac{1}{3!} (-\omega^3 a^3 b + \omega^3 b^3 a)}{\frac{1}{2} (-\omega^2 a^2 b - \omega^2 b^2 a)} \end{aligned}$$

⁽¹⁰⁾ Ossia quando $1 - \cos \omega c$ e, pertanto, con $\omega = \frac{2\pi}{\lambda}$ si ha $\lambda = c; \frac{c}{2}; \frac{c}{3}; \dots$

and such function cancels out for

$$l.d.o. = c; \frac{c}{2}; \frac{c}{3}; \dots \text{ (10)}$$

[l.d.o. = wavelength] and doubles for

$$l.d.o. = 2c; \frac{2c}{3}; \frac{2c}{5}; \dots .$$

Then, the greatest wavelength beyond which the measure does not have null values is c. When instead the measurement point is not centred, one has, developing the transfer function module:

$$\begin{aligned} M = & \sqrt{\left(-1 + \frac{b}{a+b} \cos \omega a + \frac{a}{a+b} \cos \omega b \right)^2 +} \\ & + \left(\frac{b}{a+b} \sin \omega a - \frac{a}{a+b} \sin \omega b \right)^2 \end{aligned}$$

So that $M = 0$ must be simultaneously, assuming $a > b$,

$$\omega_I = \frac{2m\pi}{b}; \omega_{II} = \frac{(n+2m)\pi}{a} \text{ (11)}$$

Now, term m must be a whole number and number n must be a whole even number. So that the two pulsations are equal, one must write

$$\frac{(n+2m)}{a} = \frac{2m}{b} \quad \text{that is} \quad n = 2m\left(\frac{a}{b} - 1\right)$$

$$n = 2m \left(\frac{10,157}{7,812} - 1 \right) = \frac{335}{558} \text{ m}$$

Now let us suppose that the base is characterised by a = 10,157 m and b = 7,812 m; we have

$$n = 2m \left(\frac{10,157}{7,812} - 1 \right) = \frac{335}{558} \text{ m}$$

⁽¹⁰⁾ that is when $1 = \cos \omega c$ and, therefore, with $\omega = \frac{2\pi}{\lambda}$ one has $\lambda = c; \frac{c}{2}; \frac{c}{3}; \dots$

⁽¹¹⁾ This from the double condition.

$b \sin \omega a - a \sin \omega b = 0$
 $b \cos \omega a + a \cos \omega b = a + b$. From the second condition one necessarily has that and that solve the first one also.
 Then, it follows that it must be

for the length b $\omega_I = \frac{2m\pi}{b}$;

for length a $\omega_{II} = \frac{(n+2m)\pi}{a}$

SCIENZA E TECNICA

$$\omega_I = \frac{2m\pi}{b}; \omega_{II} = \frac{(n+2m)\pi}{a} \quad (11)$$

Ora, il termine m deve essere un numero intero ed il numero n deve essere un intero pari. Affinchè le due pulsazioni siano uguali si deve scrivere

$$\frac{(n+2m)}{a} = \frac{2m}{b} \quad \text{ossia} \quad n = 2m\left(\frac{a}{b} - 1\right)$$

$$n = 2m\left(\frac{10,157}{7,812} - 1\right) = \frac{335}{558} \text{ m}$$

Ammettiamo, ora, che la base sia caratterizzata da $a = 10,157 \text{ m}$ e $b = 7,812 \text{ m}$; si ha

$$n = 2m\left(\frac{10,157}{7,812} - 1\right) = \frac{335}{558} \text{ m}$$

E' evidente che, in questo caso, il primo intero n pari non può essere 2, perché m non sarebbe un intero.

Si calcola, pertanto, che il primo intero n pari che risolve è 670 (e di conseguenza $m = 1116$). Allora, lo 0 della funzione di trasferimento è

$$\omega = \frac{2 \times 1116 \pi}{7,812} = 142,857 \times 2\pi$$

da cui

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{142,857} = 0,007 \text{ m.}$$

Pertanto, dalla lunghezza d'onda di 0,007 m in su, non compaiono ulteriori 0 della FT. Rilevante, invece, l'attenzione per le lunghezze superiori a 30 m, che rende l'apparecchiatura inefficiente per il rilievo delle ondulazioni lunghe.

3.2. Misura a sbalzo

Ammettiamo che il cursore misuratore possa essere posizionato a sbalzo rispetto alla base (fig. 10).

⁽¹¹⁾ Ciò dalla doppia condizione

$b \sin \omega a - a \sin \omega b = 0$

$b \cos \omega a + a \cos \omega b = a + b$. Dalla seconda condizione si ha che necessariamente $\cos \omega a$ e $\cos \omega b = 1$ che risolve anche la prima.

Ne consegue, allora, che deve essere

per la lunghezza b $\omega_I = \frac{2m\pi}{b}$;

per la lunghezza a $\omega_{II} = \frac{(n+2m)\pi}{a}$

It is obvious that in this case, the first whole even n cannot be 2 because m would not be a whole number.

Therefore we calculate that the first whole even n that solves h the equation is 670 (and consequently m = 1116). Then, the zero of the transfer function is

$$\omega = \frac{2 \times 1116 \pi}{7,812} = 142,857 \times 2\pi$$

from which

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{142,857} = 0,007 \text{ m.}$$

Therefore, the wavelength is 0,007 m upwards, there are no further zero's of the TF. The reduction for lengths exceeding 30 m instead is significant, that makes the equipment ineffective for the detection of long undulations.

3.2. Cantilevered measure

Let us suppose that the measuring cursor can be positioned cantilevered with respect to the base (fig. 10).

Being $AB = L$; $BC = c$; $CV = m$ and also $C^*V = f(s)$; $AA^* = f(s-c-L)$; $BB^* = f(s-c)$ and supposing

$$\frac{CC'}{L+c} = \frac{BB'}{L}$$

$$CV = C C' + AA^* + C^* V$$

$$\text{therefore } m = \frac{L+c}{L} [f(s-c) - f(s-c-L)] + f(s-c-L) + f(s)$$

the measure, for a defect $f(s) = De^{-j\omega s}$, is

$$m(s) = D \left\{ \frac{L+c}{L} [e^{-j\omega(s-c)} - e^{-j\omega(s-c-L)}] + e^{-j\omega(s-c-L)} + e^{-j\omega s} \right\}$$

$$= De^{-j\omega s} \left[\frac{L+c}{L} (e^{j\omega c} - e^{j\omega(c+L)}) + e^{j\omega(c+L)} + 1 \right]$$

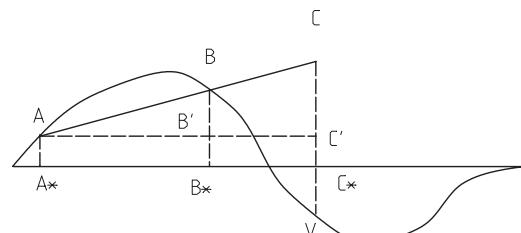


Fig. 10 - Misura a sbalzo. Cantilevered measure.

SCIENZA E TECNICA

Essendo $AB = L$; $BC = c$; $CV = m$ ed anche $C^*V = f(s)$; $AA^* = f(s-c-L)$; $BB^* = f(s-c)$ e ponendo

$$\frac{CC'}{L+c} = \frac{BB'}{L}$$

$$CV = C'C' + AA^* + C^*V$$

$$\text{quindi } m = \frac{L+c}{L} [f(s-c) - f(s-c-L)] + f(s-c-L) + f(s)$$

la misura, per un difetto $f(s) = De^{-j\omega s}$, vale

$$\begin{aligned} m(s) &= D \left\{ \frac{L+c}{L} [e^{-j\omega(s-c)} - e^{-j\omega(s-c-L)}] + e^{-j\omega(s-c-L)} + e^{-j\omega s} \right\} = \\ &= De^{-j\omega s} \left[\frac{L+c}{L} (e^{j\omega c} - e^{j\omega(c+L)}) + e^{j\omega(c+L)} + 1 \right] \end{aligned}$$

La funzione di trasferimento vale

$$H(\omega) = \left[\frac{L+c}{L} (e^{j\omega c} - e^{j\omega(c+L)}) + e^{j\omega(c+L)} + 1 \right]$$

Si osserva che per una lunghezza onda grande (tendente all'infinito) la funzione tende ad 2.

L	6 m
c	5 m

Dalla fig. 11 si osserva che con tale dispositivo - purtroppo di improbabile realizzazione pratica - si otterrebbero per difetti di grande lunghezza d'onda, misure caratterizzate da Funzione di Trasferimento quasi costante.

4. Rappresentazione del difetto

La rappresentazione del difetto è, dunque, data, per ogni progressiva dalla somma della componente "curvatura teorica" e della combinazione di trigonometriche rappresentative della difettosità. Eliminando la curvatura teorica, sussiste la sola combinazione di trigonometriche e si avrà la rappresentazione come:

$$m(s) = \sum_{i=1}^N D_i e^{-j[\omega_i s + \varphi_i]} \times (-1 + \beta e^{j\omega a} + \alpha e^{-j\omega b})$$

dove N è teoricamente illimitato e

$$\omega_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$$

e φ_i , rispettivamente la pulsazione e la fase di ogni onda.

Nella fig. 12 è illustrato un diagramma di allineamento.

The transfer function is

$$H(\omega) = \left[\frac{L+c}{L} (e^{j\omega c} - e^{j\omega(c+L)}) + e^{j\omega(c+L)} + 1 \right]$$

One can see that for a great wavelength (with an infinite trend) the function tends to 2.

L	6 m
c	5 m

From figure 11 one can see that with such device – unfortunately unlikely to be practically built – one would obtain measures characterised by an almost constant Transfer Function for great wavelength defects.

4. Representation of the defect

The representation of the defect is therefore given for each point by the sum of the "theoretic curvature" component and of the trigonometric combination representing defectiveness. Eliminating the theoretic curvature, only the trigonometric combination remains and the representation will be:

$$m(s) = \sum_{i=1}^N D_i e^{-j[\omega_i s + \varphi_i]} \times (-1 + \beta e^{j\omega a} + \alpha e^{-j\omega b})$$

where N is theoretically unlimited and

$$\omega_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$$

and φ_i , the pulsation and the phase of each wave respectively.

An alignment diagram is shown in fig. 12.

It concerns an inflection point, detected with the Amster carriage in the 60's. The detection made reference to the curve at km 122 of the Rome-Sulmona route in the Aielli tunnel. One can see the right curve connected to the

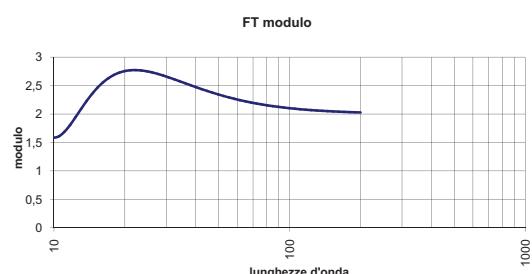


Fig. 11 - Misura a sbalzo - Funzione di trasferimento. Cantilevered measure – Transfer function.

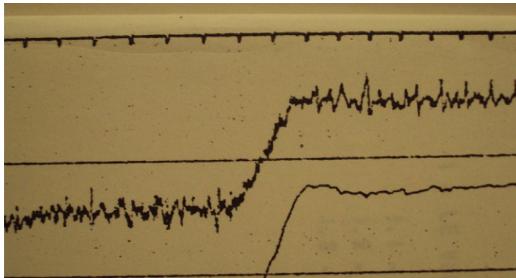


Fig. 12 – Registratore Amsler. *Amsler recording.*

Si tratta di un flesso, rilevato con la vettura Amsler negli anni 1960. Il rilievo si riferiva alla curva al km 122 della linea Roma-Sulmona, nella galleria di Aielli. Si nota la curva destra raccordata con quella sinistra (tratti a "frecce" costanti) da una curva parabolica (tratto a frecce linearmente variabili). A tali valori si sovrappongono le ondulazioni dovute alla difettosità: ben visibili i picchi dovuti ai difetti isolati (le giunzioni).

Nella fig. 13, la registrazione del livello longitudinale su base 6,5 m, eseguita con la VV 026, ora "Talente", sul binario pari della DD. Roma-Firenze al km 216 (Renacci).

La registrazione a) è del 11.3.1992, ossia a lavori di posa del binario finiti e poco prima dell'apertura all'esercizio; la b) è del 23.11.1992, ossia con gli effetti di 8 mesi di traffico. La constatazione del notevole assestamento del binario, in presenza di circolazioni veloci, suggerì l'adozione della vibrocompattazione in fase di alzamento del binario per le future linee ad Alta Velocità.

5. L'analisi delle registrazioni

Fino a che non si è potuta digitalizzare la misura, l'analisi delle registrazioni non poteva che essere grafica. Naturalmente le ampiezze del difetto, affette dalla funzione di trasferimento, non riproducevano l'entità del difetto effettivo. Ma ciò non escludeva l'individuazione dei difetti pericolosi - da eliminare tempestivamente - né la possibilità di classificare qualitativamente la geometria del binario ispezionato.

Nella fig. 14, i risultati del controllo di qualità del binario, effettuato secondo il criterio contrattuale FS - anni 1980 - a lavori di manutenzione eseguiti.

Si trattava, in sostanza, di determinare la presenza di eventuali superamenti di soglie di difettosità ammissibili: graduando la soglia, si potevano determinare i difetti preoccupanti per la sicurezza, oppure quelli da tenere sotto controllo. Nella figura il superamento della soglia di tolleranza di allineamento, avrebbe comportato l'applicazione di un coefficiente di qualità 0,9 con effetti sul corrispettivo di appalto. Il rilievo è stato eseguito con attrezzatura PV7.

left one (sections with constant "sags") by a parabolic curve (section with linearly variable sags). Such values are overlapped by the undulations due to defectiveness: the peaks caused by isolated defects are clearly visible (the joints).

In fig. 13, the longitudinal level recording on a 6.5 m basis, is performed with the VV 026, now "Talente", on the even track of the Rome-Florence DD at km 216 (Renacci).

Recording a) is dated 11.3.1992, that is upon termination of the track laying works and shortly before starting operation; b) is dated 23.11.1992, that is with the effects of 8 months of traffic. The ascertainment of the considerable subsidence of the track, with fast circulations, suggested the adoption of vibrocompaction during track raising for future High Speed lines.

5. Analysis of the recordings

Until the measurement couldn't be digitalised, the analysis of the recording was necessarily graphic. Of course, the magnitudes of the defect, affected by the transfer function, did not produce the effective size of the defect. But this did not exclude the identification of the dangerous defects - to be promptly eliminated - nor the possibility of qualitatively classifying the geometry of the inspected track.

Fig. 14 reports the results of the track quality control, performed - in the 80's - according to the FS contractual criterion after having carried out maintenance works.

It basically concerned the determination of the existence of any acceptable defectiveness thresholds exceeded: by grading the threshold, the worrying defects in terms of safety or those to be kept under control could be determined. In the figure, exceeding the alignment threshold tolerance would have led to the application of a 0.9 quality coefficient with effects on the tender compensation. The detection was performed with PV7 equipment.

At the end of the 70's, the use of carriages fitted with information processing systems and storage of the information recorded, and the availability of processing pro-

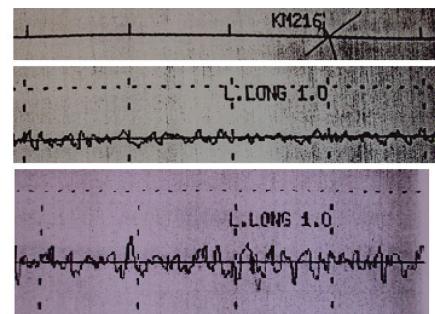


Fig. 13 – Registratore Talete. *Talente recording.*

SCIENZA E TECNICA

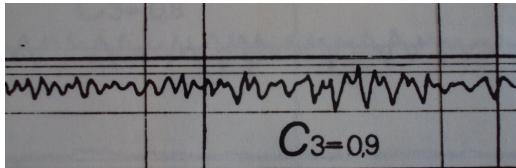


Fig. 14 - Registrazione PV 7. PV 7 recording.

Alla fine degli anni 1970, l'impiego di vetture attrezzate con sistemi di trattamento informatizzato e di memorizzazione dei dati registrati, e la disponibilità di programmi di elaborazione, permetteva l'analisi quantitativa delle registrazioni: fra i criteri di maggior successo fu adottata l'*analisi in frequenza*.

Infatti, le difettosità in argomento, al netto della misura dovuta all'andamento teorico del tracciato, del profilo e della rampa di sopraelevazione sono, in assenza di errori sistematici, da considerare, poiché rispondenti alla teoria degli errori, come grandezze aleatorie [la media dei valori è nulla, gli errori di grande ampiezza sono rari rispetto a quelli di ampiezza piccola, ecc.].

Pertanto, se la funzione che rappresenta la difettosità aleatoria lungo lo spazio è stazionaria, ossia esiste un numero reale $L > 0$, detto *periodo*, tale che la densità di probabilità congiunta verifichi la condizione $p_n(g_n, S_n) = p_n(g_{n+L}, S_{n+L})$, [la probabilità che esista una grandezza g alla progressiva $s = n + L$, è pari a quella che essa ha alla progressiva n] le proprietà statistiche di quella funzione non variano quando si trasli l'asse degli spazi.

Se l'osservazione di una sola registrazione è sufficiente per descrivere la funzione, questa si definisce ergodica e nelle applicazioni pratiche, quando il processo è stazionario, si assume che sia anche ergodico.

Poste tali condizioni, può essere sviluppata in serie di Fourier:

- la funzione $m(s)$

$$m(s) = \sum_{-\infty}^{\infty} m_n e^{jn\omega_0 s}$$

con m_n coefficiente competente all'armonica n ed $\omega_0 = \frac{2\pi}{L}$ (ossia la pulsazione ciclica);

- e la funzione di autocorrelazione

$$R(s, \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(s)m(s+\tau) ds$$

che fornisce lo spettro di densità

$$G(\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} R(s, t) e^{jn\omega_0 s}.$$

Per il dettaglio delle suesposte considerazioni si suggerisce di consultare [19].

grammes, allowed the quantitative analysis of the recordings: amongst the most successful criteria the *frequency analysis* was adopted.

In fact, the defects dealt with, net of the measure due to the theoretic trend of the layout, of the profile and of the superelevation ramp are to be considered as random quantities, without systematic errors, since they correspond to the error theory, [the average of the values is null, errors with a great magnitude are rare compared to those with a small one, etc.].

Therefore, if the function representing the random defectiveness along space is stationary, that is to say a real $L > 0$ number exists, called *period*, such that the joint probability density function verifies the condition $p_n(g_n, S_n) = p_n(g_{n+L}, S_{n+L})$, [the probability that there is a quantity g at point $s = n + L$, is equal to the one it has at point n] the statistic properties of that function do not vary when the axis of the space is translated.

If the observation of just one recording is sufficient to describe the function, this is defined as ergodic and when the process is stationary in practical applications, it is supposed that it is also ergodic.

Given these conditions, the following can be developed in Fourier series:

- the $m(s)$ function

$$m(s) = \sum_{-\infty}^{\infty} m_n e^{jn\omega_0 s}$$

with coefficient m_n competent to the n harmonic and

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{L}$$

(that is cyclic pulsation);

- and the autocorrelation function

$$R(s, \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(s)m(s+\tau) ds$$

that gives the density spectrum

$$G(\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} R(s, t) e^{jn\omega_0 s}.$$

For the detail of the above-mentioned considerations please refer to [19].

Actually, the individual measurement values have been neatly stored during recording, that is in the direction progression. Therefore there is no $m(s)$ function but rather the series of values related to an extended date.

Therefore, a discrete analysis will have to be performed for their processing and to this end the "*Discrete Fourier Transform*" lends itself well.

Let us remember that such transform (often abbreviated as DFT, Discrete Fourier Transform) establishes a bi-

SCIENZA E TECNICA

In realtà, in registrazione sono stati memorizzati, ordinatamente, ossia nella progressione di marcia, i singoli valori di misura per cui non si dispone della funzione $m(s)$ bensì della successione dei valori relativi ad una data estesa.

Pertanto, per la loro elaborazione andrà eseguita una analisi discreta ed, a tal uopo, ben si presta la "Trasformata di Fourier Discreta".

Ricordiamo che detta trasformata (spesso abbreviata a DFT, Discrete Fourier Transform) stabilisce una relazione biunivoca tra due n-pie di numeri (in generale complessi).

Data una successione:

m_n con $n = 0, 1, \dots, N-1$, che sono i singoli valori ordinati della misura, si definisce sua trasformata di Fourier discreta la successione di

X_q con $q = 0, 1, \dots, N-1$, espressa da:

$$X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n e^{-j\frac{2\pi}{N} nq}$$

per $q = 0, 1, \dots, N-1$

Scrivendo l'esponenziale in forma trigonometrica si può osservare che i coefficienti della DFT sono uguali a

$$\operatorname{Re}(X_q) = \frac{2}{L} a_q \quad \operatorname{Im}(X_q) = -\frac{2}{L} b_q$$

Dove con a_q e b_q sono i coefficienti della serie di Fourier⁽¹²⁾.

⁽¹²⁾ Infatti

$$X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n \left(\cos \frac{2\pi}{N} qn - j \sin \frac{2\pi}{N} qn \right)$$

Se i valori m_n sono stati prelevati ogni Δs costante, si ha che

$$\frac{1}{N} = \frac{\Delta s}{L}$$

da cui

$$X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n \left(\cos \frac{2\pi}{L} qn \Delta s - j \sin \frac{2\pi}{L} qn \Delta s \right);$$

ma $n \Delta s = s_n$, quindi

$$X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n \left(\cos \frac{2\pi}{L} qs_n - j \sin \frac{2\pi}{L} qs_n \right),$$

$$\text{ma è anche } X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n (\cos \omega_q s_n - j \sin \omega_q s_n)$$

Ricordando i coefficienti della serie di Fourier, di una funzione armonica in L ,

$$a_q = \frac{2}{L} \int_0^L m(s) \cos \omega_q s \, ds \approx \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} m_n \cos \omega_q s_n$$

$$b_q = \frac{2}{L} \int_0^L m(s) \sin \omega_q s \, ds \approx \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} m_n \sin \omega_q s_n$$

unique relationship between two series of n numbers (generally complex).

Given a series:

m_n with $n = 0, 1, \dots, N-1$, that are the individual ordinate values of the measure, the following series is defined by their discrete Fourier transform

X_q with $q = 0, 1, \dots, N-1$, expressed by:

$$X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n e^{-j\frac{2\pi}{N} nq}$$

for $q = 0, 1, \dots, N-1$

Writing the exponential in a trigonometric way one can see that the DFT coefficients are equal to

$$\operatorname{Re}(X_q) = \frac{2}{L} a_q \quad \operatorname{Im}(X_q) = -\frac{2}{L} b_q$$

where a_q e b_q are the Fourier⁽¹²⁾ series coefficients.

For $q = 0$ the DFT returns,

$$X_0 = \sum_{n=0}^{N-1} m_n = N \mu,$$

that is the average value multiplied by N .

The anti-transformation formula (IDFT Inverse Discrete Fourier Transform) is:

⁽¹²⁾ In fact

$$X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n \left(\cos \frac{2\pi}{N} qn - j \sin \frac{2\pi}{N} qn \right)$$

If the m_n values have been taken every constant Δs , the result is

$$\frac{1}{N} = \frac{\Delta s}{L}$$

from which

$$X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n \left(\cos \frac{2\pi}{L} qs_n - j \sin \frac{2\pi}{L} qs_n \right);$$

ma $n \Delta s = s_n$, quindi

$$X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n \left(\cos \frac{2\pi}{L} \omega_q s_n - j \sin \frac{2\pi}{L} \omega_q s_n \right),$$

$$\text{ma è anche } X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n (\cos \omega_q s_n - j \sin \omega_q s_n)$$

Bearing in mind the Fourier series coefficients of a harmonic function in L ,

$$a_q = \frac{2}{L} \int_0^L m(s) \cos \omega_q s \, ds \approx \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} m_n \cos \omega_q s_n$$

$$b_q = \frac{2}{L} \int_0^L m(s) \sin \omega_q s \, ds \approx \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} m_n \sin \omega_q s_n$$

SCIENZA E TECNICA

Per $q = 0$ la DFT restituisce

$$X_0 = \sum_{n=0}^{N-1} m_n = N\mu,$$

ossia il valore medio moltiplicato per N.

La formula di antitrasformazione (IDFT Inverse Discrete Fourier Transform) è:

$$m_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_q e^{-j \frac{2\pi}{N} nk}$$

per $n = 0, 1, \dots, N-1$

In effetti, però, il calcolo della DFT non viene mai implementato secondo la definizione qui data, ma si preferisce utilizzare algoritmi ottimizzati (denominati trasformata di Fourier veloce, o in inglese FFT da Fast Fourier Transform) che richiedono uno sforzo computazionale minore.

Sulla scorta delle considerazioni sin qui esposte, è ora, possibile esporre le applicazioni operative conseguenti.

5.1. Rilievo di un difetto isolato e puntuale

Si intende un difetto isolato e puntuale un'irregolarità (spesso d'ampiezza notevole) di estensione molto limitata e tale che fra questa e la successiva sia presente un tratto regolare di apprezzabile lunghezza. Rientrano tra questi difetti - p.es. - le traverse cedevoli (traverse ballerine), le giunzioni allentate, le sfrecciatura a cuside, ecc.

Consideriamo, ora ad esempio, sul profilo longitudinale, un difetto di tal genere e di ampiezza unitaria, diretto verso il basso e di lunghezza teoricamente infinitesima. Sia rilevato con una base lunga $a + b$. Quando l'estremità anteriore della base giunge sul difetto si abbassa di 1 ed il punto di misura segna

$$\frac{b}{a+b} = \beta;$$

quando il punto di misura è sul difetto, la misura è -1; quando l'estremità posteriore è sul difetto, il misuratore segna

$$\frac{a}{a+b} = \alpha;$$

pertanto, avremo registrato tre picchi: il centrale negativo, alla progressiva s, i 2 estremi positivi, rispettivamente, in $s + a$ e $s - b$ (fig. 15).

Se operiamo la Trasformata di Fourier del segnale misurato, si ha

$$\mathfrak{J}(m) = \int_{-\infty}^{\infty} m(s) e^{-j\omega s} ds = \beta e^{-j\omega(s+a)} + \alpha e^{-j\omega(s-b)} - 1 e^{-j\omega s} = e^{-j\omega s} (\beta e^{-j\omega a} + \alpha e^{j\omega b} - 1)$$

La trasformata del difetto è,

$$\mathfrak{J}(d) = -e^{-j\omega s},$$

$$m_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_q e^{-j \frac{2\pi}{N} nk}$$

for $n = 0, 1, \dots, N-1$

In fact, the calculation of the DFT is never implemented according to the definition given here, but the use of optimised algorithms is preferred (called FFT which stands for Fast Fourier Transform) that require less computational effort.

On the basis of the considerations stated up to this point, it is now possible to explain the consequent operational applications.

5.1. Detection of an isolated and punctual defect

An irregularity is an isolated and punctual defect (often with a considerable magnitude) with a very limited extension and such that between this one and the following one there is a regular section with a significant length. Among these defects for example are the yielding sleepers, slack joints, cusps, etc.

Let us consider for example, on the longitudinal profile, a similar defect with unit magnitude, in a downward direction and with a theoretical infinite length; let's suppose that it is detected with a base long $a + b$. When the front end of the base reaches the defect it decreases by 1 and the measurement point indicates

$$\frac{b}{a+b} = \beta;$$

when the measurement point is on the defect, the measure is -1; when the rear end is on the defect, the meter indicates

$$\frac{a}{a+b} = \alpha;$$

therefore, we will have recorded three peaks: the negative central one, at point s, the 2 positive ends, respectively in $s + a$ and $s - b$ (fig. 15).

If we perform the Fourier Transform of the measured signal, we have

$$\mathfrak{J}(m) = \int_{-\infty}^{\infty} m(s) e^{-j\omega s} ds = \beta e^{-j\omega(s+a)} + \alpha e^{-j\omega(s-b)} - 1 e^{-j\omega s} = e^{-j\omega s} (\beta e^{-j\omega a} + \alpha e^{j\omega b} - 1)$$

The transform of the defect is

$$\mathfrak{J}(d) = -e^{-j\omega s},$$

that is the transform of the negative unit pulse (-1) that is distant s from the origin of the coordinates.

Hence, the relation between the transform of the measure and that of the defect is exactly the transfer function of the equipment.

Now, given the measure transform, in order to have the transform of the defect again, we must calculate

SCIENZA E TECNICA

ossia la trasformata dell'impulso unitario negativo (-1) distante s dall'origine delle coordinate.

Pertanto, il rapporto tra la trasformata della misura e quella del difetto è esattamente la funzione di trasferimento dell'apparecchiatura.

Data, allora, la trasformata della misura, per riavere la trasformata del difetto si calcola

$$\Im(d, \omega) = \frac{\Im(m, \omega)}{FT(\omega)}$$

$$\text{ossia}$$

$$\Im(d, \omega) = \frac{e^{-j\omega s} (\beta e^{-j\omega a} + \alpha e^{j\omega b} - 1)}{\beta e^{-j\omega a} + \alpha e^{j\omega b} - 1} = e^{-j\omega s}$$

Ne consegue che il difetto isolato, e distanziato dal successivo di una distanza maggiore della base, è riprodotto, come picco centrale, 1 a 1.

Con la base di misura della carrozza di rilievo V 025, che era di 3,60 m, venivano ben registrati - come sopra detto - i difetti puntuali di livello, che all'epoca costituivano il grosso della difettosità, tanto che la grandezza aveva il nome di "salti".

5.2. Rilievo di un difetto sinusoidale ripetitivo

Nel caso che su tutta l'estesa rilevata sia presente esclusivamente un difetto ripetitivo (per esempio sinusoidale), di ampiezza A mm e lunghezza d'onda λ m, la sua trasformata è

$$\Im(d, \omega) = A[\delta(\omega+a) - \delta(\omega-a)]$$

ossia la Dirac che nell'asse continuo delle pulsazioni (tra - infinito ed + infinito) in corrispondenza della pulsazione della funzione $\pm a = 2\pi / \lambda$, dà una riga di spessore nullo ed ordinata complessa $-jA/2$ ⁽¹³⁾.

La trasformata di Fourier della misura è, allora,

$$\Im(m, \omega) = -j \frac{A}{2} [\delta(\omega+a) - \delta(\omega-a)] \times H(\omega),$$

dove $H(\omega)$ è la funzione di trasferimento dell'apparecchiatura. Ribaltando sull'asse delle pulsazioni positive si ha:

$$\Im(m, \omega) = jA[\delta(\omega+a) - \delta(\omega-a)] \times H(\omega)$$

⁽¹³⁾ Ponendo la funzione Asen (a s) =

$$A \frac{1 \times e^{jas} - 1 \times e^{-jas}}{2j}$$

per il teorema del ritardo della funzione unitaria 1, posta a distanza $\pm a$ s dall'origine, si ha

$$\Im(f(s), \omega) = -j \frac{A}{2} [\delta(\omega-a) + \delta(\omega+a)]$$

Per la dimostrazione si rinvia a "Trasformazione di Fourier delle distribuzioni" in [17].

$$\Im(d, \omega) = \frac{\Im(m, \omega)}{FT(\omega)}$$

that is

$$\Im(d, \omega) = \frac{e^{-j\omega s} (\beta e^{-j\omega a} + \alpha e^{j\omega b} - 1)}{\beta e^{-j\omega a} + \alpha e^{j\omega b} - 1} = e^{-j\omega s}$$

It follows that the isolated defect, distanced by the following by a greater distance of the base, is reproduced 1 to 1 as central peak.

With the base measure of the V 025 measurement carriage, that was 3,60 m, the punctual level defects were well recorded – as mentioned above – that at the time were the majority of the defectiveness, so much so that they were called "jumps".

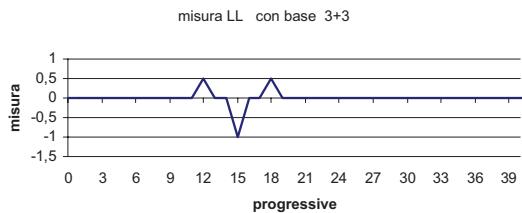


Fig. 15 - Registrazione di un difetto di livello longitudinale isolato di ampiezza -1. Recording of an isolated longitudinal level defect with a -1 magnitude.

5.2. Detection of a sinusoidal repetitive defect

In case just a repetitive defect (sinusoidal for instance) is found on all the area surveyed, with a magnitude of A mm and a wavelength of λ m, its transform is

$$\Im(d, \omega) = A[\delta(\omega+a) - \delta(\omega-a)]$$

that is the Dirac function that in the continuous axis of the pulsations (between - infinite and + infinite) in correspondence of the function pulsation $\pm a = 2\pi / \lambda$, gives a thick line and complex ordinate $-jA/2$ ⁽¹³⁾.

The Fourier transform of the measure is then,

$$\Im(m, \omega) = -j \frac{A}{2} [\delta(\omega+a) - \delta(\omega-a)] \times H(\omega),$$

where $H(\omega)$ is the transfer function of the equipment. Turning over to the positive pulsations axis we have:

⁽¹³⁾ With the Asen (as) function =

$$A \frac{1 \times e^{jas} - 1 \times e^{-jas}}{2j}$$

for the theorem of the delay of the unitary function 1, placed at a distance $\pm a$ from the origin, we have

$$\Im(f(s), \omega) = -j \frac{A}{2} [\delta(\omega-a) + \delta(\omega+a)]$$

For the demonstration please refer to "Fourier Transformation of the distributions" in [17].

SCIENZA E TECNICA

immaginaria giacché la funzione $f(s)$ è una funzione dispari (seno).

L'apparecchiatura ha dunque registrato un difetto di forma sinusoidale, lunghezza d'onda L , modulo e fase regolati dalla funzione di trasferimento dell'apparecchiatura.

Detta difettosità sarà memorizzata come una successione ordinata di valori discreti alla distanza Δs (passo di misura, in genere = 1 m).

Stante la non disponibilità della funzione espressa - rappresentativa della misura - non è possibile eseguire la trasformata di Fourier, ma ci si deve accontentare della trasformazione discreta, ossia calcolare i coefficienti spettrali

$$X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n e^{-j\frac{2\pi}{N}nq}$$

Il procedimento ha dei limiti di approssimazione in ragione del rapporto tra lunghezza d'onda del difetto ed estesa della successione di valori.

Sia λ la l.d.o. del difetto ed L la lunghezza di campionamento, posta la funzione rappresentativa del difetto come

$$Y(s) = -j \frac{D}{2} (e^{j\Omega s} - e^{-j\Omega s})$$

dove $Y(s)$ è l'ordinata sulla tangente all'origine per ogni ascissa curvilinea s , con

$$\frac{2\pi}{\lambda} = \Omega,$$

si calcola la FFT della traiettoria nell'intervallo $0 \div L$.

Posto $\omega_0 = 2\pi / L$ e con $k = \Omega / \omega_0$ si ha, ricordando che, con un passo di misura 1, $N = L / 1$

$$FFT[Y_s]_q = \sum_{n=0}^{N-1} Y_n e^{-j\frac{2\pi}{N}nq} = \sum_{s=0}^{L-1} Y_s e^{-j\frac{2\pi}{L}sq} = \sum_{s=0}^{L-1} Y_s e^{-j\omega_0 qs}$$

con $q = 0, 1, 2, 3 \dots$. Mutando le sommatorie in integrali, abbiamo

$$FFT[Y(s)_q] = \int_0^L Y(s) e^{-jq\omega_0 s} ds = \\ = -j \frac{D}{2} \int_0^L (e^{j\Omega s} - e^{-j\Omega s}) e^{-jq\omega_0 s} ds = -j \frac{D}{2} \int_0^L (e^{j\omega_0(k-q)s} - e^{-j\omega_0(k+q)s}) ds$$

Questo integrale vale

$$FFT[Y(s), \omega_q] = \frac{D}{2\omega_0} \left\{ -\frac{1}{(k-q)} [e^{j\omega_0(k-q)L} - 1] + \right. \\ \left. + \frac{1}{(k+q)} [-e^{-j\omega_0(k+q)L} + 1] \right\}$$

Poniamo, ora, $q = 0$

$$FFT[Y(s), \omega_0] = \frac{D}{2k\omega_0} \left\{ -e^{j\omega_0 k L} - e^{-j\omega_0 k L} + 2 \right\} = \frac{D}{2\Omega} - e^{j\Omega L} - e^{-j\Omega L} + 2$$

$$\Im(m, \omega) = jA[\delta(\omega+a) - \delta(\omega-a)] \times H(\omega)$$

it is imaginary, since the $f(s)$ function is an odd function (sine).

The equipment has therefore recorded a defect with a sinusoidal shape, L wavelength, module and phase regulated by the transfer function of the equipment.

Such defectiveness will be stored as a neat series of discrete values at a Δs distance (measure pitch, generally = 1 m).

Due to the unavailability of the expressed function – representative of the measure – the Fourier transform cannot be performed, but we have to make do with the discrete transform, that is calculate the spectral coefficients.

$$X_q = \sum_{n=0}^{N-1} m_n e^{-j\frac{2\pi}{N}nq}$$

The procedure has approximation limits due to the relation between wavelength of the defect and the length of the values series.

Given the wavelength of the defect λ and the length of the sampling L , given the representative function of the defect as

$$Y(s) = -j \frac{D}{2} (e^{j\Omega s} - e^{-j\Omega s})$$

where $Y(s)$ is the ordinate on the tangent at the origin for each s curvilinear axis, with

$$\frac{2\pi}{\lambda} = \Omega,$$

the FFT of the path can be calculated in the $0 \div L$ interval.

Given $\omega_0 = 2\pi / L$ and with $k = \Omega / \omega_0$ we have, bearing in mind that with a measure pitch of 1, $N = L / 1$:

$$FFT[Y_s]_q = \sum_{n=0}^{N-1} Y_n e^{-j\frac{2\pi}{N}nq} = \sum_{s=0}^{L-1} Y_s e^{-j\frac{2\pi}{L}sq} = \sum_{s=0}^{L-1} Y_s e^{-j\omega_0 qs}$$

with $q = 0, 1, 2, 3 \dots$. Changing the summation notation in integrals, we have

$$FFT[Y(s)_q] = \int_0^L Y(s) e^{-jq\omega_0 s} ds = \\ = -j \frac{D}{2} \int_0^L (e^{j\Omega s} - e^{-j\Omega s}) e^{-jq\omega_0 s} ds = -j \frac{D}{2} \int_0^L (e^{j\omega_0(k-q)s} - e^{-j\omega_0(k+q)s}) ds$$

The value of this integral is

$$FFT[Y(s), \omega_q] = \frac{D}{2\omega_0} \left\{ -\frac{1}{(k-q)} [e^{j\omega_0(k-q)L} - 1] + \right. \\ \left. + \frac{1}{(k+q)} [-e^{-j\omega_0(k+q)L} + 1] \right\}$$

SCIENZA E TECNICA

che è il valore medio della funzione $Y(s)$, calcolato sulla estesa $0 \div L$, moltiplicato per L .

Evidentemente se $\lambda = L$

$$FFT[Y(s), \omega_0] = \frac{D}{2\Omega} \left\{ -e^{j2\pi} - e^{-j2\pi} + 2 \right\} = 0$$

Poniamo, ora, $q \neq 0$ e $k = q$

Si ha

$$FFT[Y(s), \omega_q] = \frac{DL}{4\pi} \left\{ -\frac{1}{0}[1-1] + \frac{1}{2q}[-1+1] \right\}$$

Questa forma indeterminata vale $D \times L$, cioè per il numero d'ordine q uguale al rapporto L/λ , si ha una riga nello spettro: infatti, per quel numero d'ordine la l.d.o. è pari a quella della funzione. Per tutti gli altri numeri d'ordine la trasformata vale 0.

Quando invece $k \neq q$, ossia la lunghezza d'onda della funzione non è sottomultiplo della lunghezza di analisi, per nessun numero d'ordine la trasformata vale $D \times L$, ma un valore prossimo. I valori per i numeri d'ordine che si distanziano da quello dove q è più vicino a k , diminuiscono progressivamente, tendendo a 0 (fig. 16).

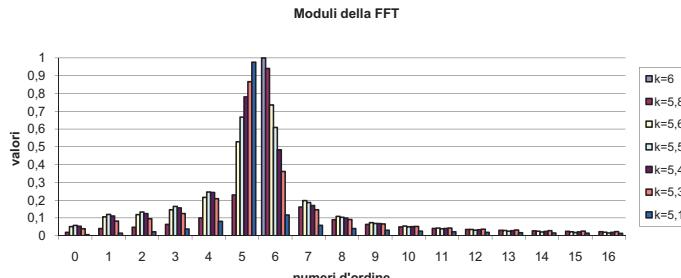


Fig. 16 – Grafico valori FFT. FFT values diagram.

Pertanto, quando la l.d.o. del segnale è sottomultiplo della fondamentale, la trasformata discreta dà lo stesso segnale della trasformata continua.

Quando, invece, ciò non si verifica (ed è la assoluta generalità dei casi), lo spettro rappresentato non è più una riga, in corrispondenza della lunghezza d'onda, ma una serie di righe in prossimità della lunghezza data (fenomeno di leaking).

In altri termini la FFT della misura eseguita su una estesa diversa dalla lunghezza d'onda della traiettoria restituirà uno spettro comprendente righe per ogni pulsazione con coefficienti diversi da 0.

Nella fig. 17 è rappresentato lo

Now let us suppose $q = 0$

$$FFT[Y(s), \omega_0] = \frac{D}{2k\omega_0} \left\{ -e^{j\omega_0 kL} - e^{-j\omega_0 kL} + 2 \right\} = \frac{D}{2\Omega} - e^{j\Omega L} - e^{-j\Omega L} + 2$$

that is the average value of the function $Y(s)$, calculated on the length $0 \div L$, multiplied by L .

Evidently if $\lambda = L$

$$FFT[Y(s), \omega_0] = \frac{D}{2\Omega} \left\{ -e^{j2\pi} - e^{-j2\pi} + 2 \right\} = 0$$

Now let us suppose $q \neq 0$ e $k = q$

We have

$$FFT[Y(s), \omega_q] = \frac{DL}{4\pi} \left\{ -\frac{1}{0}[1-1] + \frac{1}{2q}[-1+1] \right\}$$

the value of this indeterminate form is $D \times L$, that is for the order number q equal to the L/λ ratio, we have a line in the spectrum : in fact, for that order number the wavelength is equal to the function wavelength. For all other order numbers the transform value is 0.

When instead $k \neq q$, that is the wavelength of the function is not a submultiple of the analysis length, for no order numbers the transform value is of $D \times L$ and its value is instead a proximal value. Order number values that outdistance from the one where q is closer to k , decrease progressively tending towards 0 (fig. 16).

Therefore when the wavelength of the signal is a submultiple of the fundamental, the discrete transform gives the same signal of the continuous transform.

When instead this does not occur (and it is absolutely the general case), the spectrum represented is no longer a line, in correspondence of the wavelength, but a series of lines close to the given wavelength (leaking phenomenon).

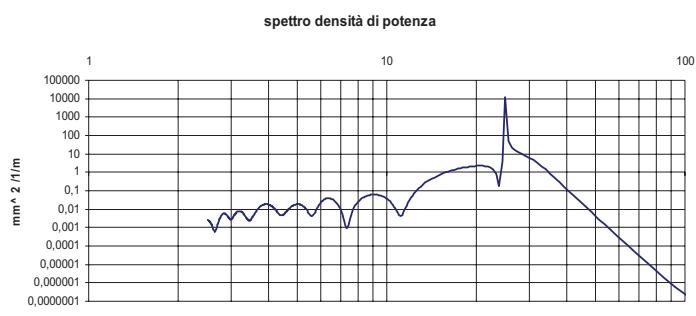


Fig. 17 – Spettro di densità di potenza di un difetto sinusoidale ripetitivo. A power density spectrum of a repetitive sinusoidal defect.

SCIENZA E TECNICA

spettro di una sinusoide di ampiezza 5 mm e lunghezza d'onda 25 m. Viene analizzata su una estesa di 1024 m.

Si noti il picco alla $L = 25$ m e la presenza delle altre righe nell'intorno (il grafico è del tipo Bode: la curva non deve essere intesa come funzione continua, bensì come involucro delle ordinate delle singole righe). Si è anche applicato un filtro passa alto, con relativa attenuazione dello spettro sulle lunghezze più elevate.

5.3. Rilievo di un difetto isolato sinusoidale

In questo caso la rappresentazione della misura è una figura più complicata: infatti, all'ingresso ed alla uscita del difetto si hanno le relative evidenti transizioni (fig. 18).

La registrazione è relativa da un difetto isolato di lunghezza d'onda 25 m ed ampiezza 5 mm.

La funzione di trasferimento per tale onda vale, in modulo 0,663.

Eseguendo la trasformata della misura si ottiene lo spettro e dividendo per la FT si ottiene lo spettro della densità di potenza del difetto (fig. 19).

Si osserva che per tutte le lunghezze sono presenti componenti spettrali: per le lunghezze più elevate (> 30 m) si è operato un filtro. Quelle di intensità più grande ricadono nel campo nell'intorno dei 25 m.

5.3. Ricostruzione del difetto

Per la ricostruzione del difetto vale il seguente schema logico 1.

Caso del difetto puntuale isolato. Lo spettro della misura è esattamente lo spettro della Funzione di Trasferimento. Il quoziente della divisione è lo spettro del difetto vero: per ogni armonica il modulo è costante (e pari all'ampiezza del difetto); le fasi spettrali sono quelle connesse al ritardo del difetto rispetto all'origine delle coordinate.

La ricostruzione del difetto è esatta.

Caso del difetto sinusoidale ripetitivo di lunghezza d'onda non sottomultiplo di quella di campionamento (registrazione con base 6+4)

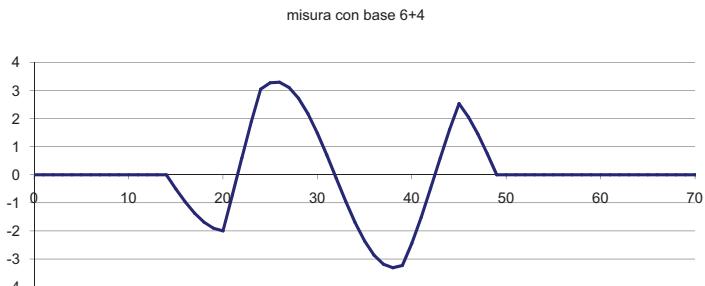


Fig. 18 - Misura di un difetto sinusoidale isolato. *Measurement of an isolated sinusoidal defect.*

In other terms the FFT of the measure performed on an length different from the wavelength of the path will give a spectrum including lines for each pulsation with coefficients different from 0.

The spectrum of a sinusoid with a magnitude of 5 mm and a wavelength of 25 m is represented in fig. 17. It is analysed on an length of 1024 m.

The peak at $L = 25$ m and the presence of the other surrounding lines are to be noticed (the diagram is a Bode type one: the curve must not be understood as continuous function but as envelope of the ordinates of the individual lines). A high-pass filter has also been applied, with relevant reduction of the spectrum on the highest lengths.

5.3. Detection of a sinusoidal isolated defect

In this case the representation of the measure is a more complicated figure: in fact, at the entrance and at the exit of the defect, the related evident transitions are found (fig. 18).

The recording is related to an isolated defect having a wavelength of 25 m and a magnitude of 5 mm.

The module of the transfer function for such wavelength is 0,663.

Performing the transform of the measure the spectrum is obtained and dividing by the TF the power density spectrum of the defect is obtained (fig. 19).

One can observe that spectral components are present for all lengths: for the highest lengths (> 30 m) a filter was used. Those with greater intensity fall around 25 m.

5.3. Reconstruction of the defect

The following logical diagram 1 is for the reconstruction of the defect.

Isolated punctual defect case. The measure spectrum is exactly the Transfer Function spectrum. The division quotient is the spectrum of the real defect: the module is constant for each harmonic (and equal to the magnitude of the defect); the spectral phases are those related to the defect delay with respect to the origin of the coordinates.

The reconstruction of the defect is correct.

Repetitive sinusoidal defect case with a wavelength that is not a submultiple of the sampling one (recording that cannot be considered periodical).

In this case, while the equipment gives a measure – magnitude and phase determined by the transfer Function, but with a wavelength equal to that of the defect - the FFT

SCIENZA E TECNICA

zione non assimilabile a periodica).

In questo caso, mentre che l'apparecchiatura restituisce una misura - di ampiezza e fase determinate dalla Funzione di trasferimento, ma di lunghezza d'onda pari a quella del difetto - la FFT restituisce uno spettro di coefficienti a "campana" intorno alla l.d.o. spettrale più vicina a quella del difetto (effetto leaking)⁽¹⁴⁾. La divisione di questo spettro per la Funzione di Trasferimento fornirà ancora uno spettro a campana deformato. Considerando le vetture di misura indicate inizialmente (lunghezza base circa 20 m), per lunghezze d'onda del difetto > di 30 m il contributo distorto-

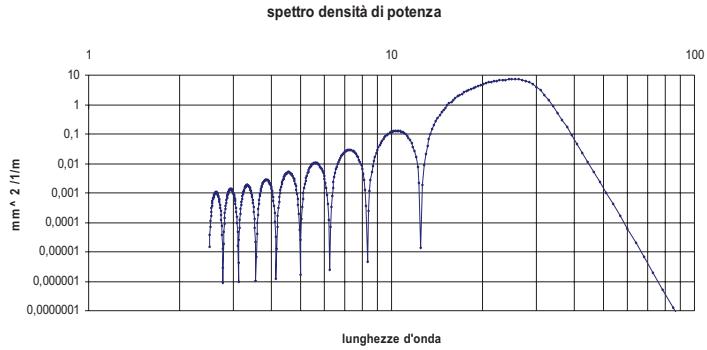
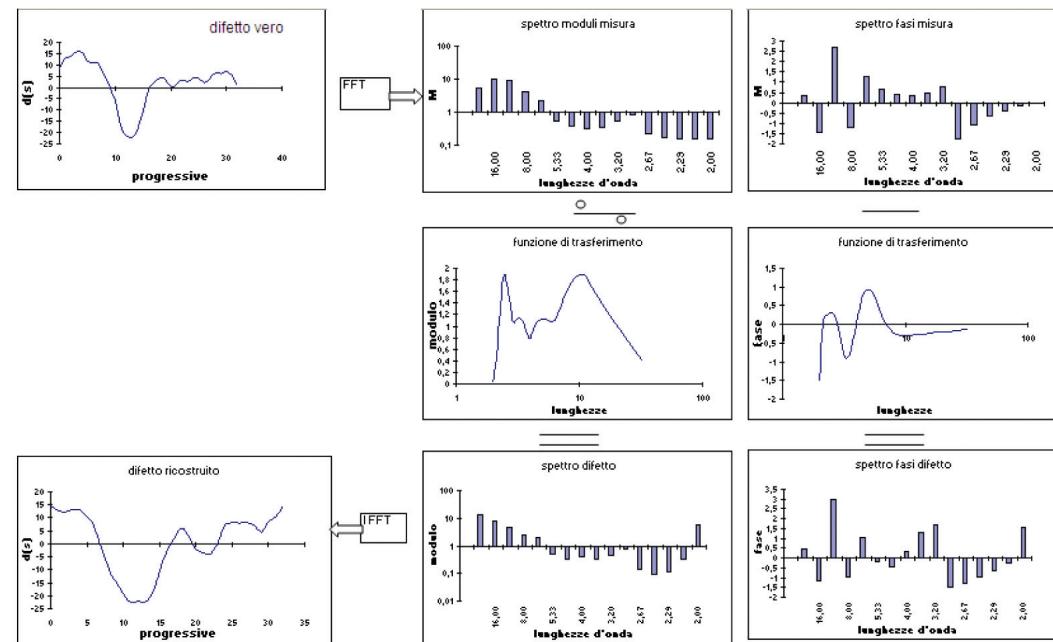


Fig.19 – Spettro di densità di potenza di un difetto sinusoidale isolato. *Power density spectrum of an isolated sinusoidal defect.*



Schema 1 - Diagram 1

⁽¹⁴⁾ Soltanto con una fondamentale di pulsazione prossima a 0, si può attenuare l'inquinamento dovuto al fenomeno di leaking: infatti, lo spettro si infittisce e la dispersione tra armoniche successive è piccola. Ma tale soluzione, insieme alla maggiore complessità computazionale richiede di analizzare estese molto lunghe (essendo $L_{max} = 1/f_0$) per le quali la condizione di periodicità diventa ancora più difficile da riscontrare (p.es. per i maggiori errori dei contributi sulla misura delle curve e dei raccordi, che, come detto, devono essere eliminati preventivamente all'analisi in frequenza).

⁽¹⁴⁾ Only with a pulsation fundamental close to 0, the distortion due to the leaking phenomenon can be decreased: in fact, the spectrum becomes thicker and the dispersion among successive harmonics is lower. But such solution, together with the greater computational complexity requires the analysis of very long sections (being $L_{max} = 1/f_0$) for which the periodical condition becomes increasingly difficult to detect (e.g. for greater contributions errors on the measure of the curves and of the transitions that, as has been said, must be eliminated prior to the frequency analysis).

SCIENZA E TECNICA

della funzione di trasferimento assume una importanza decisiva. Ne consegue che la ricostruzione dei difetti a lunga ondulazione diverge più o meno sensibilmente dal difetto vero in rapporto alla misura dello scostamento tra lunghezza d'onda del difetto e lunghezza spettrale.

Ad es. si sia registrato un difetto seno di ampiezza 3 mm e l.d.o. 70 m.

L'estesa di campionamento sia 256 m. Allora la frequenza fondamentale è 1/256; il numero d'onda più vicino è intero (256/70) = 4, quindi L=64 m.

L'apparecchiatura ha una funzione di trasferimento che nel campo superiore a 20 m può essere assimilata⁽¹⁵⁾ ad una esponenziale [$FT(L) = 3e^{-0.0314L}$]: quindi, per le lunghezze a cavallo di quella data, si ha:

- Lunghezza m	FT
- 85,33	0,069
- 70	0,111
- 64	0,134

La varianza del segnale è 4,5. La varianza delle tre componenti spettrali a cavallo di 64 vale 4,439. Se un punto di vista "energetico" l'analisi potrebbe risultare soddisfacente, la ricostruzione non è soddisfacente. Infatti, la variazione della FT per le due armoniche a cavallo della l.d.o. del segnale (che contribuiscono prevalentemente a ricomporre il segnale di ingresso) stanno alla FT che ha effettivamente operato sul difetto come $0,069 / 0,111 = 0,621$ e $0,134 / 0,111 = 1,207$

Caso del difetto sinusoidale isolato

In questo caso la funzione è certamente riguardabile come periodica. Purtroppo, neanche in tal caso la ricostruzione sarà esatta: infatti, la funzione di trasferimento (dipendente esclusivamente dalla lunghezza d'onda ed invariante rispetto alla progressiva) che si implementa nel calcolo è quella a regime (ossia quando tutta la base è sull'ondulazione); nei tratti estremi la funzione assume valori diversi, in quanto uno dei due estremi appoggia su una traiettoria retta.

Caso generale

Per la verifica di quanto sia adeguata la ricostruzione sarà sufficiente - in generale - analizzare con FFT il risultato ottenuto dalla antitrasformazione (cioè il difetto lungo s), operare la moltiplicazione per la FT e confrontare l'andamento della misura registrata con quella di confronto.

Detta esposizione è più immediata se riferita ad un caso concreto, quale una registrazione di livello longitudinale di una fuga di rotaia effettuata su una linea AV, in precedenza alla sua attivazione all'esercizio, con la car-

gives a "flared" coefficient spectrum around the spectral wavelength closest to the defect one (leaking effect)⁽¹⁴⁾. The division of this spectrum for the Transfer Function will give another deformed flared spectrum. Considering the measurement vehicles indicated at the beginning (base length of approximately 20 m), for a defect wavelength > 30 m the distortion contribution of the transfer function takes on a decisive importance. It follows that the reconstruction of long undulation defects differs more or less markedly from the real defect in relation to the measure of the gap between wavelength of the defect and spectral length.

For example, a sine defect with a magnitude of 3 mm and wavelength of 70 m has been recorded.

The sampling extension is 256 m. Then the fundamental frequency is 1/256; the closest wavelength number is a whole number (256/70) = 4, hence L=64 m.

The equipment has a transfer function that in the field over 20 m can be assimilated⁽¹⁵⁾ to an exponential [$FT(L) = 3e^{-0.0314L}$]: therefore, for lengths straddling the given one, we have

- Length m	FT
- 85,33	0,069
- 70	0,111
- 64	0,134

The variance of the signal is 4.5. The value of the variance of the three spectral components around 64 is 4.439. If from an "energy" point of view, the analysis does not seem to be satisfactory, the reconstruction is not satisfactory. In fact, the TF variation for the two harmonics around the wavelength of the signal (that mainly contribute to recomposing the entry signal) are at the TF that has actually worked on the defect as $0,069 / 0,111 = 0,621$ and $0,134 / 0,111 = 1,207$

Isolated sinusoidal defect case

In this case the function can be certainly considered as periodical. Unfortunately, the reconstruction will not be exact in this case also: in fact, the transfer function (depending exclusively on the wavelength and not varying with respect to the point) that is implemented in the calculation is the steady state one (that is when all the base is on the undulation); in the end sections the function takes on different values since one of the two ends leans on a straight path.

General case

In order to verify the adequacy of the reconstruction it will generally be sufficient to analyse the result obtained

⁽¹⁵⁾ Come si ottiene dalla funzione "linea di tendenza" di EXCEL®

⁽¹⁵⁾ How it is obtained from the "trend line" function in EXCEL®

SCIENZA E TECNICA

rozza rilievo Talete che ha una base di

a	10,157 m
b	7,812 m

Il rilievo è stato eseguito su una tratta in retta in discesa costante del 1,8%; non è, quindi, necessaria alcuna operazione per ottenere le misure nette dalle componenti di curvatura della traiettoria.

Si analizza una tratta di 1012 m, allo scopo di avere una numerosità della successione di dati pari ad una potenza intera di 2.

Campione 1024 m - binario dispari km 102,500 - 103,524

Livello longitudinale (fig. 20).

Per la rettilineità del tracciato, e per l'ipotesi che la difettosità sia costituita da una combinazione di trigonometriche, la media dei valori dovrebbe essere pari a 0.

L'accertamento se la successione sia periodica non è positivo: infatti, il valore iniziale del secondo periodo è differente dal valore iniziale del primo periodo [m (1024) ≠ m(0)]. Inoltre, la media non è nulla (anche se è piccolissima, ossia uguale a 0,0019 mm).

Ne deriva che per la non linearità della funzione di trasferimento, il risultato del processo di ricostruzione del

misura LL

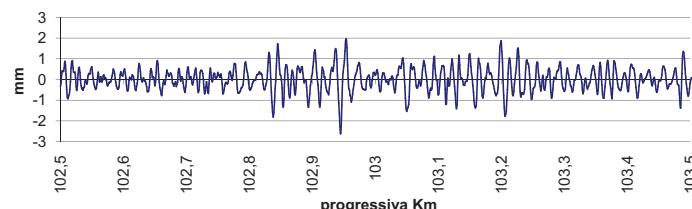


Fig. 20 - Misura di livello longitudinale. *Measure of a longitudinal level.*

difetto sarà più o meno impreciso.

Accettandosi, però, approssimazioni si può mitigare l'errore limitandosi a riprodurre le difettosità di lunghezza d'onda comprese entro un determinato campo, applicando un filtro che tagli le componenti ad elevata lunghezza d'onda.

Eseguita sulla successione dei dati "misura" la FFT, si ottiene lo spettro dei moduli e delle fasi di ciascuna armonica che costituisce il segnale. Si divide lo spettro complesso per la fun-

from the anti-transformation (that is the defect along s) with the FFT, multiply by the TF and compare the trend of the recorded measure with the comparison one.

The above is more immediate if referred to a specific case, such as a longitudinal level recording of a track stretch performed on a HS line, prior to beginning operation, with the detector carriage Talete that has a base of

a	10,157 m
b	7,812 m

The survey was performed on a straight section with a 1.8% constant downhill grade; it is therefore not necessary to perform any operation in order to obtain the net measures from the path curvature components.

A section long 1012 m is analysed in order to have a number of sequences of data equal to a whole power of 2.

Sample 1024 m – odd track km 102.500 – 103.524

Longitudinal level (fig. 20).

For the straightness of the layout and for the hypothesis that the defectiveness is due to trigonometric combination, the average of the values should be equal to 0.

The ascertainment that the sequence is periodical is not positive: in fact, the initial value of the second period is different to the initial value of the first period [m (1024) ≠ m(0)]. Furthermore, the average is not equal to zero (even though small, that is equal to 0,0019 mm).

It follows that due to the non linearity of the transfer function, the result of the reconstruction process of the defect will be more or less inaccurate.

However, by accepting approximations, the error can be decreased by just reproducing the wavelength defectiveness within a well-defined field, applying a filter that cuts the high wavelength components.

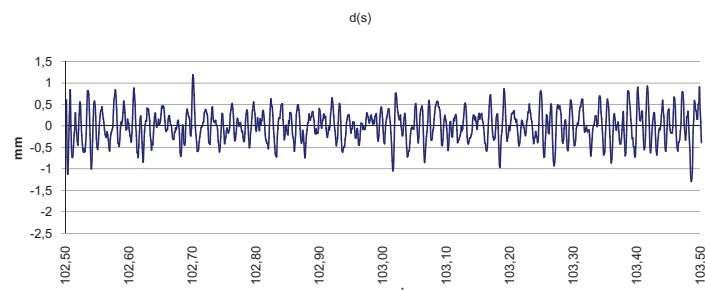


Fig 21 - Ricostruzione del difetto misurato. *Reconstruction of the measured defect.*

SCIENZA E TECNICA

zione di trasferimento e si ottiene lo spettro del difetto quasi-vero.

Detto spettro sottoposto ad un filtro del 8° ordine Butterford, con lunghezza d'onda di taglio di 200 m e con esso antitrasformando si ha la rappresentazione del difetto lungo lo sviluppo del tracciato.

Si ottengono i risultati in fig. 21.

Il difetto quasi-vero si mantiene entro i valori +1,3; -1,3 mm; inoltre, eseguendo il calcolo della varianza sul difetto lungo s, ossia

$$V = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{n-1} d_i^2$$

si ottiene $V = 0,191 \text{ mm}^2$, con $n = 1024$ ed $L = 1024 \text{ m}$.

Si è eseguita, anche, la valutazione della Varianza sui risultati della Fast Fourier Trasform cui si è sottoposta la successione dei difetti.

Detti M_q i coefficienti spettrali, ottenuti dalla FFT, si hanno i coefficienti del difetto dalla

$$D_q = \frac{M_q}{FT_q}$$

con FT_q funzione di trasferimento della vettura di rilievo. I termini q sono in numero di 512; il termine 1, è quello della frequenza fondamentale pari a $1/L = 1/1024$.

$$V = \sum \frac{|D_q|^2}{2}$$

ed è pari a $0,191 \text{ mm}^2$, come doveva essere (fig. 22).

Con i singoli coefficienti D_q si ottiene, infine, la densità spettrale di potenza dalla

$$S(f) = \frac{|D_q|^2}{2\Delta f}$$

La forma della $S(f)$ conferma che la distribuzione dei difetti è sostanzialmente random e si può, allora, ammettere che con la probabilità del 99,7% non si ha un difetto di modulo superiore a $+ - 3 \times 0,191^{1/2} = + - 1,31 \text{ mm}$.

Nella fig. 23 il raffronto tra la misura così come registrata e quella che si ottiene, per controllo, dopo la ricolorazione della misura in difetto reale e la successiva trasformazione di questo nuovamente in misura.

Anche se, in linea di massima, è riscontrabile un andamento molto simile risultano evidenti apprezzabili divergenze da attribuire alle approssimazioni fatte, alla eliminazione delle onde filtrate, dagli effetti del leaking, ecc.

Per raffronto ad uno spettro di densità (fig. 24) che si ricava in letteratura si riproduce quello riprodotto dallo Esveld nel suo manuale del binario [5], nel quale non sembra siano stati applicati filtri.

Once the FFT is performed on the sequence of "measure" data, the spectrum of the modules and phases of each harmonic that forms the signal are obtained. The complex spectrum is divided by the transfer function and the almost-real defect spectrum is obtained.

This spectrum is subjected to an 8th Butterford order filter, with a cut wavelength of 200 m and with anti-transformation, one has the representation of the defect along the development of the layout.

The results in fig. 21 are obtained.

The almost-real defect remains within the range +1,3; -1,3 mm; furthermore, by calculating the variance on the defect along s, that is

$$V = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{n-1} d_i^2$$

one has $V = 0,191 \text{ mm}^2$, with $n = 1024$ and $L = 1024 \text{ m}$.

The evaluation of the Variance on the results of the Fast Fourier Transform is also carried out which the sequence of defects has been subjected to.

Being M_q the mentioned spectral coefficients, obtained from the FFT, one has the defect coefficients from

$$D_q = \frac{M_q}{FT_q}$$

with the FT_q transfer function of the measurement carriage. The q terms are 512; the 1 term is that of the fundamental frequency equal to $1/L = 1/1024$.

$$V = \sum \frac{|D_q|^2}{2}$$

and is equal to $0,191 \text{ mm}^2$, as it should have been (fig. 22).

With the single D_q coefficients one finally obtains the power spectral intensity from

$$S(f) = \frac{|D_q|^2}{2\Delta f}$$

The shape of the $S(f)$ confirms that the distribution of the defects is essentially random and therefore one can acknowledge that with a 99.7% probability there is no module defect exceeding $+ - 3 \times 0,191^{1/2} = + - 1,31 \text{ mm}$.

Fig. 23 represents the comparison between the measure as it is recorded and the one obtained, for verification, after new colouring of the measure in real defect and the subsequent transformation of this in measure again.

Even though, by and large, a very similar trend can be found, significant differences appear to be evidently ascribable to the approximations made, to the elimination of the filtered waves, to the leaking effects, etc.

As comparison with a density spectrum (fig. 24) taken

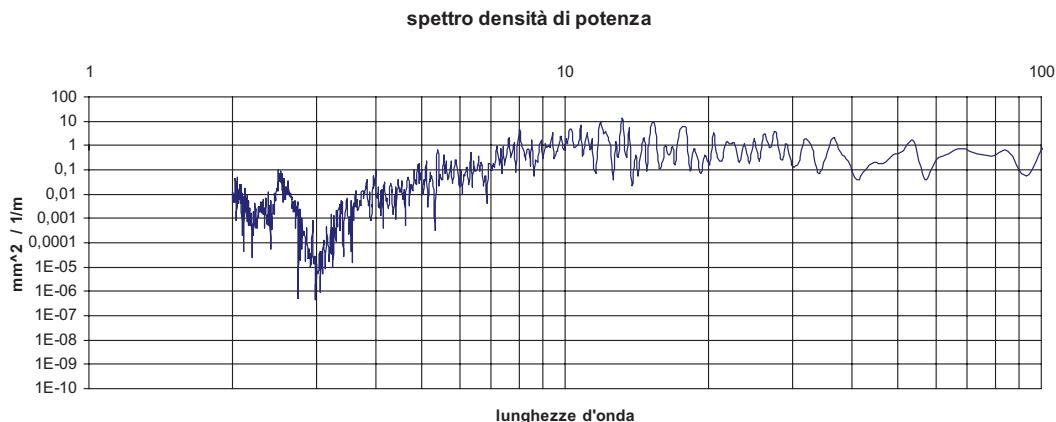


Fig. 22 - Spettro di densità di potenza del difetto ricostruito. *The power spectral density of the reconstructed defect.*

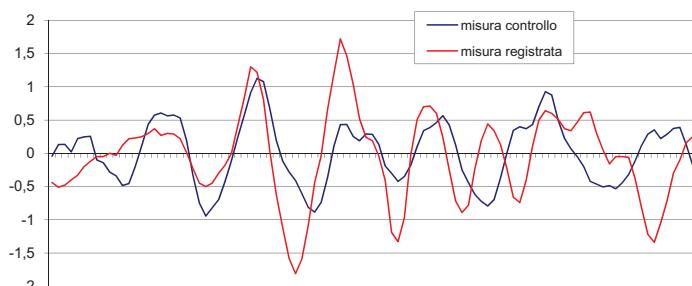


Fig. 23 - Confronto tra la misura eseguita e la trasformazione del segnale ricostruito. *Comparison between the measure taken and the transformation of the reconstructed signal.*

Confrontando lo spettro di fig. 24 (Target) con quello di fig. 22 (Spettro su campione di una tratta AV), si desume l'ottima qualità del livello longitudinale ottenuto su quella tratta di linea AV.

from literature, the one reproduced by Esvedl in his track manual [5] is reproduced, in which filters do not appear to have been applied.

Comparing the spectrum in fig. 24 (Target) with the one in fig. 22 (a spectrum on a sample of HS section), an excellent longitudinal level quality obtained on that section of the HS line is deduced.

5.4. Impact of the project curvature on the analysis of the defect

If the measure is not depurated from the project curvature values, the component due to the layout compared to the defect one may be significant and may strongly corrupt the analysis of the defectiveness itself.

5.4. Influenza della curvatura di progetto sull'analisi del difetto

Se non si depura la misura dei valori di curvatura di progetto, la componente dovuta al tracciato rispetto a quella del difetto può essere rilevante e può inquinare fortemente l'analisi della difettosità stessa.

Se, p.es. si considera la rappresentazione della misura del tracciato costituito da rettificati raccordati da un arco di curva di raggio R (fig. 25) dove è vista la misura eseguita con una base 6+4 m di un arco di cerchio di R=300 m: il valore della misura vale

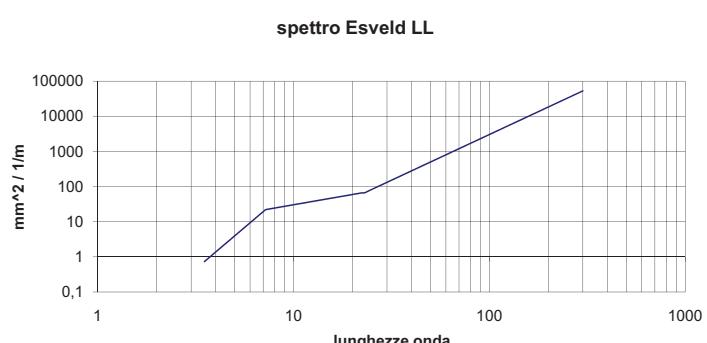


Fig. 24 - Spettro di densità di potenza di livello longitudinale (Target). *Longitudinal level power density spectrum (Target).*

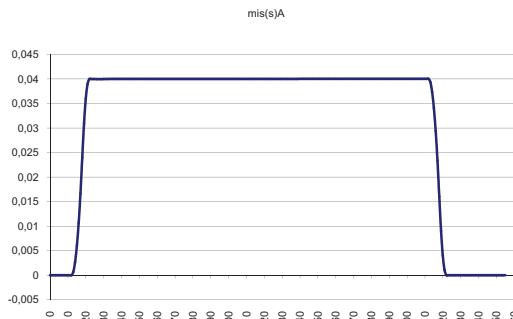


Fig. 25 - Rilievo di una curva circolare. Survey of a circular curve.

$$m(s) = \frac{6 \times 4}{2} \frac{1}{300} = 0,040 \text{ m};$$

all'inizio ed alla fine del tratto circolare la misura presenta gli "addolcimenti" dovuti all'ingresso graduale dell'asta sulla curva.

Il valore medio, sull'intera estesa, vale 0,0313: il diagramma dei moduli è in fig. 25 a.

Associamo, ora, alla misura del tracciato una difettosità sinusoidale di 1 mm su base 8 m ($\lambda = 16$ m): per questa lunghezza d'onda la FT vale in modulo $M=1,321$ mm. Ne deriva che la misura sarà data da – considerando il difetto sfasato – $0,0013 \sin(2\pi s/16)$ mm.

Il grafico del modulo presenta, ora (fig. 25b.), alla $\lambda = 16$ m un coefficiente maggiore, ma come si vede la difettosità non è nettamente distinguibile. Peraltra, si evidenziano coefficienti apprezzabili per lunghezze d'onda per le quali non si ha alcun difetto: anche in tal caso l'analisi è inquinata.

6. Misure inerziali

Come si disse, le misure inerziali evitano gli effetti negativi della misurazione su base relativa.

Peraltra, il sistema inerziale fu il primo ad essere impiegato per la sua semplicità realizzativa.

Se, infatti, consideriamo - come semplice esempio - il pendolo in fig. 26, sospeso al perno O, solidale con il veicolo di misura e con piano di oscillazione ortogonale alla traiettoria percorsa, quando il veicolo subisce uno spostamento armonico trasversale, il

If, for example, the representation of the measure of the layout formed by straight stretches connected by a curve arc with a radius R (fig. 25) is considered, where the measure taken can be seen with a 6+4 m base of a circle arc with $R=300$ m: the value of the measure is

$$m(s) = \frac{6 \times 4}{2} \frac{1}{300} = 0,040 \text{ m};$$

at the beginning and at the end of the circular section, the measure has the "easings" due to the gradual introduction of the bar in the curve.

The average value, on the whole area is 0,0313: the modules diagram is in fig. 25 a.

Now let us associate a sinusoidal defectiveness of 1 mm on an 8 m basis ($\lambda = 16$ m) to the layout measure: the TF value for this wavelength in module is $M=1,321$ mm. It follows that the measure will be given by $-0,0013 \sin(2\pi s/16)$ mm – considering the defect out of phase:

The module graph now shows a greater coefficient, at $\lambda = 16$ m, but as one can see the defectiveness is not clearly identifiable. On the other hand, significant wavelengths coefficients are highlighted for which there are no defects: in this case also the analysis is corrupted.

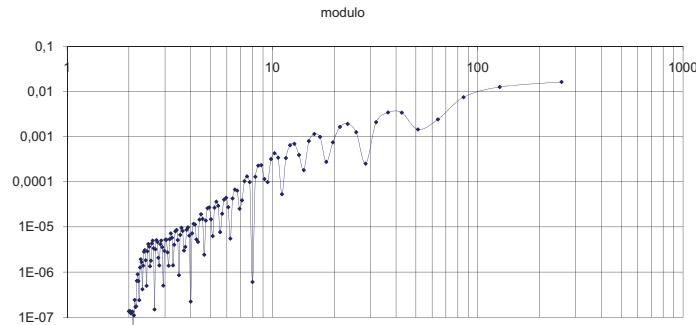


Fig. 25 a – Spettro dei moduli. Modules spectrum.

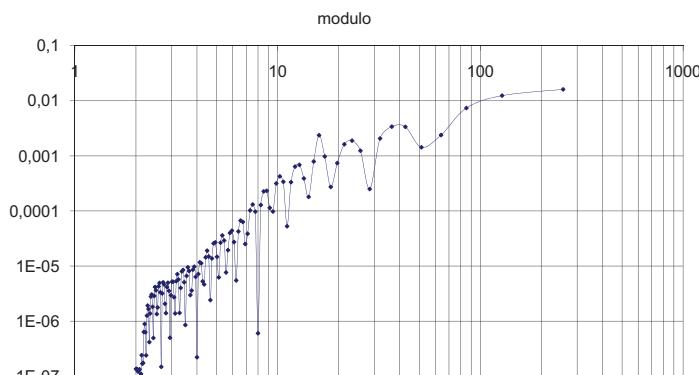


Fig. 25b – Spettro dei moduli. Modules spectrum.

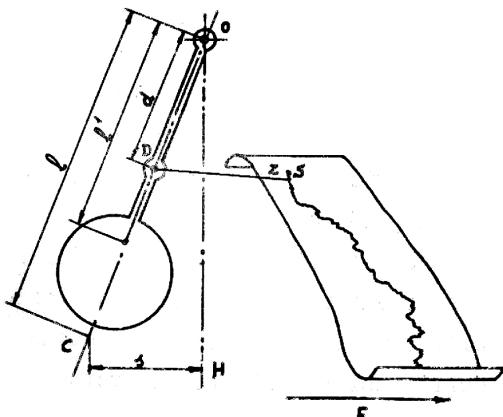


Fig. 26 - Misurazione inerziale. Inertial measurement.

perno lo segue e la massa del pendolo tende all'equilibrio sottoposta all'inerzia trasversale ed alla forza di gravità: l'asta del pendolo forma una inclinata OC, e si può misurare la distanza tra un punto del pendolo è la retta verticale passante per il perno (posizione di riposo del pendolo).

Nella realtà il pendolo è dotato, anche, di un ammortizzatore.

Se T_c è il periodo di oscillazione della cassa e T_p è il periodo proprio del pendolo si hanno i seguenti casi:

$T_c < T_p$: oscillazioni veloci della cassa; il pendolo - esaurita la fase di moto proprio smorzato - si sposta di s , nella stessa direzione ma in senso contrario allo spostamento trasversale del veicolo. Mediante uno stilo solidale con l'asta del pendolo, si rappresenta - in scala - su un foglio di carta scorrevole, trascinata da un meccanismo a molla, lo spostamento s .

$T_c > T_p$: oscillazioni lente della cassa; l'ampiezza dello spostamento - esaurita la fase smorzata - è pari allo spostamento della cassa, amplificato in base al rapporto tra periodo proprio del pendolo e quello dello spostamento impresso.

$T_c = T_p$: oscillazioni risonanti; l'oscillazione del pendolo si sincronizza con quella della cassa e l'ampiezza è funzione del coefficiente di smorzamento.

Evidentemente nella lettura dei diagrammi si deve tener conto della sopraelevazione, della flessibilità delle molle e della velocità del treno e, pertanto, devono essere applicati vari fattori correttivi.

Quanto descritto era presente nell'apparecchio Hallade, montato sulla carrozza illustrata al p.to 1.2. La trattazione completa si ritrova in [1]⁽¹⁶⁾.

⁽¹⁶⁾ Il testo citato in bibliografia è, a sua volta, una sintesi delle numerose pubblicazioni dell'Ing. LIDONNICI per le quali si rinvia ai Cataloghi della Biblioteca CIFI.

6. Inertial measures

As was said, the inertial measures avoid the negative effects of measurement on a relative basis.

On the other hand, the inertial system was the first to be used due to the easiness of its realisation.

If in fact we consider - as a simple example - the pendulum in fig. 26, suspended on the O pivot, solidly connected to the measurement vehicle and with an oscillation plane orthogonal to the path run, when the vehicle is subjected to a transversal harmonic movement, the pivot follows it and the body of the pendulum tends to balance subjected to the transversal inertia and to the force of gravity: the pendulum bar forms an OC inclination, and the distance between one point of the pendulum and the vertical line passing through the pivot can be measured (pendulum rest position).

The pendulum is actually also equipped with a shock absorber.

If T_c is the oscillation period of the body and T_p is the pendulum's period, one has the following cases:

$T_c < T_p$: fast oscillations of the body; once the pendulum's dumped proper motion is over - it moves by s , in the same direction but opposite to the transversal movement of the vehicle. The s movement is represented in scale on a sheet of sliding paper, pulled by a spring mechanism, through a stylus integral with the pendulum's bar.

$T_c > T_p$: slow body oscillations; once the pendulum's dumped phase is over - the magnitude of the movement is equal to the movement of the body, amplified according to the relation between the pendulum proper period and the one of the movement impressed.

$T_c = T_p$: resonant oscillations; the pendulum oscillation synchronises with the body one and the magnitude is function of the dumping coefficient.

When reading the diagrams one must obviously consider the cant, the flexibility of the springs and the train speed and therefore, different corrective factors must be applied.

What has been described was in the Hallade equipment, fitted on the carriage illustrated in point 1.2. The full coverage can be found in [1]⁽¹⁶⁾.

Nowadays technology makes rather complicated inertial platforms available, as much so that they are used for the detection of the track geometry and in particular of the longitudinal trend in the vertical and transversal planes.

The measurement principle derives from the obvious consideration that if one measures the horizontal and ver-

⁽¹⁶⁾ The text mentioned in bibliography is, in turn, a summary of the numerous publications of Eng. LIDONNICI for which reference must be made to the CIFI Library Catalogues.

SCIENZA E TECNICA

All'attualità, la tecnologia mette a disposizione piattaforme inerziali assai complicate, tali da essere impiegate per il rilievo della geometria del binario ed in particolare dell'andamento longitudinale nel piano verticale e trasversale.

Il principio di misurazione discende dall'ovvia considerazione che se si misurano, istante per istante, in funzione dello spazio percorso, le accelerazioni orizzontali e verticali e se è nota la velocità, mediante doppia integrazione, si ottengono gli spostamenti nelle due direzioni.

Supponiamo di semplificare il veicolo come illustrato in fig. 27: lo stesso percorre, alla velocità v , una traiettoria il cui livello longitudinale è descritto da $Z(s)$. L'accelerometro A misurerà le accelerazioni in cassa sopra il carrello, che abbiamo schematizzato come la ruota, che chiamiamo $Z''(t)$. Tramite il trasduttore T, vengono misurate le elongazioni del sistema di sospensione che valgono, in ogni istante, $E(t)$.

Integrando nel tempo due volte $Z''(t)$, dato che sono note le condizioni iniziali $Z(0) = 0$ e $Z'(0) = 0$, disponiamo della funzione $Z(t)$. Essendo questa data da $Z(t) + E(t)$ si risale al difetto alla traiettoria $D(t)$ dalla

$$D(t) = \int dt \int Z''(t) dt - E(t)$$

Noto il valore $D(t)$ si risale a quello $D(s)$ tramite il cambio di scala $s = vt$.

Naturalmente il sistema è affidabile in ragione della capacità del trasduttore di misurare correttamente le elongazioni ad alta frequenza dovute alla difettosità di corte lunghezza.

La funzione di trasferimento del difetto è pari all'unità e prossima a questa almeno per le lunghezze d'onda di interesse (fino a circa 70 m).

6.1. Misure dedotte con accelerometri a bordo di veicoli

Dalla scontata considerazione che i moti anomali del veicolo dipendono dalla difettosità geometrica di livello della via, si può risalire al difetto generatore mediante analisi del comportamento del veicolo per il tramite delle funzioni di trasferimento del rotabile.

Per il comportamento in trasversale tale correlazione non è immediata: infatti, per i giochi esistenti tra scartamento e sala l'assetto assunto dal veicolo è funzione anche di altri parametri (conicità equivalente, onda di serpeggi, ecc).

In sintesi, sia nota la "funzione inertanza" in verticale di un veicolo a carrelli, ossia la rappresentazione, espressa in accelerazioni del veicolo quando lo stesso percorre una assegnata traiettoria.

Si adotta un modello piuttosto semplificato (che, almeno, per il livello longitudinale) è in grado di dare risultati accettabili: veicolo a carrelli (interasse = 19.4 m) [pas-

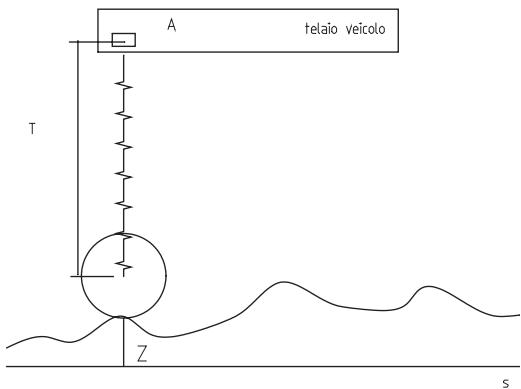


Fig. 27 - Misurazione inerziale composita. *Composite inertial measurement.*

tical accelerations, moment by moment, according to the space run, and if the speed is known, the movements in the two directions are obtained through double integration.

Let us suppose that we simplify the vehicle as illustrated in fig. 27: the same runs a path whose longitudinal level is described by $Z(s)$, at a v speed. Accelerometer A will measure the body accelerations above the bogie, that we have schematised like the wheel, that we call $Z''(t)$. Through the T transducer, the suspension system elongations are measured, whose values are $E(t)$ as function of time.

Integrating $Z''(t)$ twice over time, since the initial conditions $Z(0) = 0$ and $Z'(0) = 0$ are known, we have the $Z(t)$ function. This being given by $Z(t) + E(t)$ one goes back to the path $D(t)$ defect from

$$D(t) = \int dt \int Z''(t) dt - E(t)$$

The $D(t)$ value being known, one goes back to the $D(s)$ one through the scale $s = vt$ change.

The system is naturally reliable due to the ability of the transducer to measure correctly the high frequency elongations caused by the short length defectiveness.

The transfer function of the defect is equal to the unit and near to this for at least the wavelengths of interest (up to approximately 70 m).

6.1. Measures gathered with accelerometers on board the vehicles

From the predictable consideration that anomalous movements of the vehicle depend on the geometric defectiveness of the course's level, one can go back to the generating defect through the analysis of the vehicles behaviour by using the rolling stock's transfer functions.

For the transversal behaviour, such correlation is not

SCIENZA E TECNICA

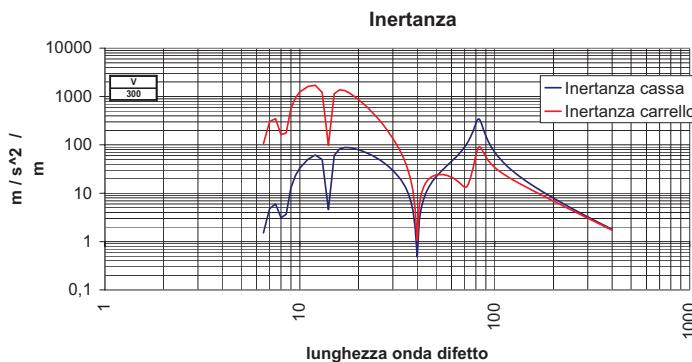


Fig. 28 - Grafico della inertanza verticale. Vertical inertance graph.

so carrelli = 2,8 m]. Con le grandezze di massa, rigidezze e smorzamenti delle sospensioni primarie e secondarie ricavabili in letteratura si può calcolare la "inertanza"⁽¹⁷⁾ in funzione della l.d.o. del difetto.

Dalla fig. 28 si osserva che, alla velocità di 300 km/h, si ha un primo massimo a circa L = 13 m: a tale lunghezza d'onda corrisponde una pulsazione $\Omega = 40,27$ rd/s che corrisponde alla frequenza accoppiata alta della vettura pari a circa 6,41 Hz.

Il secondo massimo (con un valore di inertanza della vettura di circa 272 m /s²/m) si ha per L = 85 m: a tale lunghezza d'onda corrisponde, alla velocità di 300 km/h una $\Omega = 6,16$ rd/s che corrisponde alla frequenza accoppiata bassa della vettura pari a circa 0,98 Hz.

Ammettendo di interesse accelerazioni dell'ordine di 1 m/s² si ha che questa accelerazione si otterebbe, per un difetto costituito da una sola lunghezza d'onda pari a 85, con una ampiezza di 3,67 mm.

Se la velocità fosse di 160 km/h si avrebbe la accoppiata bassa ad una lunghezza d'onda del difetto pari a 45 m circa: la stessa accelerazione si ottiene con un pari difetto (3,73 mm), ma su una lunghezza d'onda assai più piccola (45 m contro 85 m).

Per velocità costante del veicolo si può porre

$$\Omega = \frac{2\pi}{\lambda} v,$$

quindi il termine

$$\Omega^2 U = v^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 U,$$

essendo il difetto una trigonometrica, vale come la deriva seconda della traiettoria moltiplicata per v^2 .

immediate: in fact, for plays existing between gauge and the wheel set, the position taken on by the vehicle is also a function of other parameters (equivalent taper, swaying wave, etc.)

To sum up, the vertical "inertance function" in a vehicle with bogies being known, that is the representation, expressed in the vehicle accelerations when it runs an assigned path.

A rather simplified model is adopted (that, at least for the longitudinal level) capable of giving acceptable results: vehicle with bogies (wheelbase = 19,4 m) [bogie wheelbase = 2,8 m]. With the mass, stiffness and damping quantities of the primary and secondary suspensions that can be found in literature, the "inertance"⁽¹⁷⁾ as a function of the defect wavelength can be calculated.

One can see from fig. 28 that, at the speed of 300 km/h, one has a first maximum at approximately L = 13 m: a pulsation $\Omega = 40,27$ rd/s corresponds to such wavelength that corresponds to the high coupled frequency of the vehicle equal to approximately 6,41 Hz.

The second maximum (with an inertance value of the carriage of approximately 272 m /s²/m) is obtained for L = 85 m: at such wavelength, at the speed of 300 km/h, is associated a pulsation of $\Omega = 6,16$ rd/s that corresponds to the low coupled frequency of the vehicle equal to approximately 0,98 Hz.

Acknowledging the accelerations of interest in the order of 1 m/s², the result is that this acceleration would be reached for a defect consisting of just one wavelength equal to 85 m, with a magnitude of 3,67 mm.

If the speed was to be of 160 km/h one would have the low coupled frequency at a defect wavelength of approximately 45 m: the same acceleration is obtained with an equal defect (3,73 mm), but on a considerable smaller wavelength (45 m against 85 m).

For constant vehicle speed one can assume

$$\Omega = \frac{2\pi}{\lambda} v,$$

therefore the term

$$\Omega^2 U = v^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 U,$$

being it a trigonometric defect, has the value of a second derivative of the path multiplied by v^2 .

⁽¹⁷⁾ Rapporto tra la accelerazione della massa sospesa e lo spostamento del vincolo.

⁽¹⁷⁾ Relation between the suspended mass acceleration and the movement of the constraint.

SCIENZA E TECNICA

Per la proprietà della trasformata di Fourier⁽¹⁸⁾ possiamo porre la trasformata dell'accelerazione della cassa uguale alla trasformata della difettosità moltiplicata per Ω^2 e per la funzione di trasferimento della cassa $C(\Omega)$.

Quindi si avrà

$$FFT(\ddot{X}, \Omega) = C(\Omega) \Omega^2 FFT(U, \Omega).$$

Quindi, ricordando le espressioni della densità di potenza

$$S(\ddot{X}, \Omega) = \frac{1}{2} \frac{|FFT(\ddot{X}, \Omega)|^2}{\Delta \Omega} = \frac{1}{2} C^2(\Omega) \Omega^4 \frac{|FFT(U, \Omega)|^2}{\Delta \Omega}$$

$$S(\ddot{X}, \Omega) = \frac{1}{2} I^2(\Omega) \frac{|FFT(U, \Omega)|^2}{\Delta \Omega}$$

dove si è posta la funzione inertanza $I(\Omega) = C(\Omega) \Omega^2$.

Essendo

$$|FFT(U, \Omega)|$$

lo spettro del difetto – ottenuto da

$$|FFT(M, \Omega)/H(\Omega)|$$

- si può porre

$$S(\ddot{X}, \Omega) = \frac{1}{2} I^2(\Omega) \frac{|FFT(M, \Omega)|^2}{H^2(\Omega)} \frac{1}{\Delta \Omega} = \frac{1}{2} I^2(\Omega) \frac{S(M, \Omega)}{H^2(\Omega)}$$

Risulterebbe, pertanto, almeno per il verticale, una relazione diretta tra lo spettro della misura e lo spettro delle accelerazioni verticali in vettura⁽¹⁹⁾.

Integrando, quindi, lo spettro della misura e moltiplicando per il rapporto

$$\frac{I^2(\Omega)}{H^2(\Omega)},$$

si ottiene direttamente la varianza dell'accelerazione del veicolo.

Naturalmente, il limite di accettabilità del criterio è da ricondurre alla giustezza della funzione di trasferimento: infatti, essa dovrebbe tener conto delle non linearità delle risposte delle sospensioni, dell'esistenza di gradi di libertà del veicolo che non possono essere trascurabili, ecc.

Simili restrizioni possono essere quanto meno ridotte, ma con notevole appesantimento del modello di calcolo e relativi condizionamenti pratici di impiego dei programmi di calcolo.

7. Conclusioni

Come in tanti settori dell'Ingegneria, anche la disciplina

⁽¹⁸⁾ La trasformata della derivata n di una funzione è data dalla trasformata della funzione moltiplicata per $(j\Omega)^n$.

⁽¹⁹⁾ Per una più estesa trattazione si rinvia a [18].

For the property of the Fourier transform⁽¹⁸⁾ we can assume the body acceleration transform equal to the defec-tiveness transform multiplied by Ω^2 and by the transfert function of the body $C(\Omega)$.

We will therefore have

$$FFT(\ddot{X}, \Omega) = C(\Omega) \Omega^2 FFT(U, \Omega).$$

Hence, bearing in mind the power density expressions

$$S(\ddot{X}, \Omega) = \frac{1}{2} \frac{|FFT(\ddot{X}, \Omega)|^2}{\Delta \Omega} = \frac{1}{2} C^2(\Omega) \Omega^4 \frac{|FFT(U, \Omega)|^2}{\Delta \Omega}$$

$$S(\ddot{X}, \Omega) = \frac{1}{2} I^2(\Omega) \frac{|FFT(U, \Omega)|^2}{\Delta \Omega}$$

where the inertance function is $I(\Omega) = C(\Omega) \Omega^2$.

Being

$$|FFT(U, \Omega)|$$

the defect spectrum – obtained from

$$|FFT(M, \Omega)/H(\Omega)|$$

- one can acknowledge

$$S(\ddot{X}, \Omega) = \frac{1}{2} I^2(\Omega) \frac{|FFT(M, \Omega)|^2}{H^2(\Omega)} \frac{1}{\Delta \Omega} = \frac{1}{2} I^2(\Omega) \frac{S(M, \Omega)}{H^2(\Omega)}$$

The result would therefore be, at least for the vertical, a direct relation between the measure spectrum and the vehicle's vertical acceleration spectrum⁽¹⁹⁾.

Therefore integrating the measure spectrum and multiplying by the ratio

$$\frac{I^2(\Omega)}{H^2(\Omega)},$$

the vehicles acceleration variance is obtained directly.

Of course, the criterion acceptability limit is ascribable to the correctness of the transfer function: in fact, it should take into account the non linearity of the responses of the suspensions, the presence of degrees of freedom of the vehicle that are important, etc.

Similar restrictions can be reduced to say the least, but with considerable overload of the calculation model and relevant practical impact on the use of calculation programmes.

7. Conclusions

As in many Engineering fields, the "geometric status of

⁽¹⁸⁾ The transform of the n derivative of a function is given by the function transform multiplied by $(j\Omega)^n$.

⁽¹⁹⁾ For full coverage please refer to [18].

SCIENZA E TECNICA

“stato geometrico del binario” è avanzata insieme al progresso tecnologico delle apparecchiature di misura ed allo sviluppo dei criteri e degli strumenti di calcolo.

Ciò consente di soddisfare appieno le esigenze di conoscenza dei gestori dell’infrastruttura, anche per i binari di maggiori prestazioni: infatti, le incertezze sull’effettivo stato della via, che solo pochi anni addietro potevano essere anche essere notevoli - stante l’apprezzamento quasi del tutto qualitativo delle difettosità - si sono via via ridotte ed i livelli d’attendibilità delle misure sono, oggi, del tutto adeguati.

Altre migliorie sono alle viste e potranno perfezionare quanto ancora richiede approfondimento.

Si fa particolare riferimento alle ineliminabili difficoltà di ricostruzione della vera difettosità, quando si dispone di misure prelevate con base relativa per i limiti riproducibili alle incertezze sui risultati forniti dai modelli di calcolo (con particolare riferimento alle ondulazioni a grande lunghezza d’onda).

Per la verità, l’analisi in frequenza, che tanto ha contribuito - nell’ultimo trentennio - alla investigazione della via, sta cedendo il passo alle tecniche d’indagine rese possibili dai rilievi di tipo inerziale che, in linea di principio, sono indenni dai molesti effetti della funzione di trasferimento delle apparecchiature su base relativa.

Tali tecniche “inerziali” dovendo necessariamente elaborare segnali accelerometrici (o riconducibili a spostamenti) richiedono l’impiego di strumenti applicati su strutture del veicolo di ispezione vicine al binario (per le misurazioni del comportamento in verticale la posizione classica è la boccola della sala). Per il trasversale - essendosi ormai eliminati i desueti palpatori, la questione è più complicata, ma risolvibile mediante letture ottiche ad alta precisione.

La buona qualità geometrica dei binari della rete AV - ottenuta con speciale attenzione al contenimento delle difettosità ad onda lunga mediante l’impiego (per la correzione del livello longitudinale e dell’andamento trasversale del tracciato) della “base assoluta” nelle successive fasi di alzamento e posizionamento del binario sulla sede, ha confermato che per i binari in questione sono ineludibili le misurazioni geodetiche.

Esse, tuttavia, sono impiegabili per nuove costruzioni o rinnovamenti, ma - per questi ultimi - se da eseguire su linee di non recentissima costruzione sarebbero da recuperare i capisaldi topografici d’origine ed relativi raffittimenti. Infine, non si prospetta agevole la trasposizione dei tracciati ottimizzati con la correzione delle “frecce” - affetti da non trascurabili approssimazioni di calcolo - a tracciati ottimizzati su coordinate topografiche assolute.

In definitiva, la pratica operativa di corretta costruzione e mantenimento del binario nonché l’esperienza dedotta alle recenti ed impegnative realizzazioni, suggeriscono che con l’adozione sistematica e sinergica dei sistemi illustrati, si ottiene il miglior risultato possibile in termini di controllo efficace dello stato geometrico del binario.

the track” discipline has developed together with the technological progress of measurement equipment and with the development of the criteria and calculation tools.

This allows to fully satisfy the knowledge needs of the infrastructure managers, also for high performance tracks: in fact, the uncertainties on the actual condition of the course, that just a few years ago could have also been considerable – owing to the almost complete qualitative and quantitative estimation of the defectiveness – have gradually decreased and the levels of reliability of the measures today are through and through adequate.

Other improvements are on the views and may perfect what still needs to be investigated.

Particular reference is made to reconstruction difficulties of the real defectiveness that cannot be eliminated, when one has measures taken with relative base for the limits ascribable to uncertainties on the results supplied by calculation models (with particular reference to the undulations with great wavelengths).

To be honest, the frequency analysis that has so much contributed to the investigation of the line over the last thirty years, is giving way to the survey techniques made possible by the inertial type surveys that, in principle, are safe from disturbing effects of the transfer function of equipment on a relative basis.

These “inertial” techniques require the use of tools applied to the inspection vehicle structures close to the track (for the measurement of vertical behaviour, the classic position is the axle box of the wheelbase) since they need to process accelerometer signals. The matter is more complicated for the transversal behaviour, since the obsolete pads have now been eliminated, but solvable by using high precision optical readings.

The good geometric quality of the HS network tracks - achieved with special attention on the control of long wave defectiveness through the use of the “absolute base” (for the correction of the longitudinal level and transversal trend of the layout) in the subsequent track raising and positioning phases in the track bed, has confirmed that geodetic measurements for the tracks concerned are ineluctable.

They can however be used for new constructions or renovations, but with regards to the latter - should this be performed on lines not built recently - the original topographic datum points and the relevant thickenings would have to be recovered. Lastly, the transformation of the optimised layouts with the “sags” correction to optimised layouts on absolute topographic coordinates does not appear to be easy - influenced by important calculation approximations.

To sum up, the operational practice of correct construction and track maintenance as well as the experience gathered from recent and demanding realisations, suggest that with the systematic and synergic adoption of the systems illustrated, the best result possible is obtained in terms of effective control of the geometric status of the track.

SCIENZA E TECNICA

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] C. GADDINI, "Apparecchi registratori per la verifica delle condizioni del binario", FS -Scuola centrale del Servizio Lavori e Costruzioni – 1968.
- [2] R. ROUSSE, "Les moyens modernes de mesure et d'analyse des données relatives au contrôle de l'état géométrique des voies ferrées", Matisa 1974.
- [3] M. MANCINI e F. NATONI, "La nuova carrozza di rilievo dei binari", La Tecnica Professionale 8/1985.
- [4] C. FOCACCI e F. MONTANARI, "La livellazione del binario", Ingegneria Ferroviaria 9/1986.
- [5] C. ESVELD, "Modern railway track", 1990 e seg.
- [6] Tariffa dei prezzi FS, "AM", Ed. 1992
- [7] Direzione Comunicazione di Mercato, RFI, "Archimede, il treno misure di Rete Ferroviaria Italiana" Aprile 2003.
- [8] G. MAFFEI, "La diagnostica mobile dell'infrastruttura in Rfi", La Tecnica Professionale 7-8/2003
- [9] S. LANNI, "La realizzazione della sovrastruttura ferroviaria della linea Roma-Napoli", Ingegneria Ferroviaria 10/2003.
- [10] G. MAFFEI e S. GIZZI, "Diagnostica mobile e manutenzione armamento", La Tecnica Professionale 3/ 2004.
- [11] S. LANNI e N. CABRAS, "Posa e manutenzione del binario in base assoluta", Ingegneria Ferroviaria 3/2006.
- [12] Applicazioni ferroviarie – Binario - Qualità geometrica del binario – Parte 2°: Sistemi di misura – Veicoli per la Misurazione del binario, Unifer 14/09/2006.
- [13] M. MANCINI, "Aspetti della qualità geometrica del binario", Ingegneria Ferroviaria 2/2007.
- [14] RFI – Direzione Tecnica, "Standard di qualità geometrica del binario con velocità fino a 300 km/h", Giugno 2007.
- [15] B. LICHTBERGER, "Manuale del binario", Eurail press 2010.
- [16] F. MANNARA e N. BARBATI, "Campagna sperimentale di misura delle accelerazioni sulle boccole delle sale di un treno etr 220 della Ferrovia Circumvesuviana", Ingegneria Ferroviaria 5/2010.
- [17] KRASNOK, KISELEV, MAVARENKO, "Funzioni di una variabile complessa e loro applicazioni", Ed. Mir. Mosca.
- [18] A. BONADERO, "Metodi statistici e dinamica ferroviaria", Ingegneria Ferroviaria 11/1982.
- [19] G. DIANA, F. CHELI, "Dinamica e vibrazioni dei sistemi meccanici", 2° Volume, Utet Libreria.

AVVISO AI LETTORI

Si informano i Signori lettori che recentemente sul sito web del CIFi è stato aggiornato il database degli articoli di *"Ingegneria Ferroviaria"*, estendendo la disponibilità dal 1946 al 2010. Link: <http://www.cifi.it/PIContent.asp> Analogico aggiornamento è stato realizzato per il database degli articoli de *"La Tecnica Professionale"* dal 1979 al 2010. Link: <http://www.cifi.it/PTContent.asp>

SCIENZA E TECNICA

Sommaire

LA GÉOMÉTRIE DU RAIL – APPAREILS DE MESURE ET CRITÈRES D'ANALYSE

Les améliorations apportées aux instruments de mesure et la possibilité d'élaboration rapide et massive des données enregistrées permettent d'atteindre une connaissance profonde de l'état géométrique du rail. Toutefois, à cause des limitations typiques des systèmes de mesure et de certains critères d'analyse, il faut accepter des seuils d'incertitude au niveau de l'entité effective et de la configuration de la géométrie mesurée.

L'adoption de méthodes complexes de reproduction de la mesure et l'intégration de critères différents entre eux permet, toutefois, de garder sous contrôle telles incertitudes dans des limites acceptables. En partant d'un bref rappel sur les développements récents des appareils de mesure, cet article propose certaines considérations sur les méthodes d'analyse de la géométrie du rail, tout en mettant en relief à quel point les techniques actuelles d'élaboration puissent en perspective, fournir des résultats complètement satisfaisant aussi pour les rails aux performances les plus élevées.

Zusammenfassung

DIE GLEISGEOMETRIE - MESSGERÄTE UND BEWERTUNGSKRITERIEN

Fortschrittliche Messgeräte und schnelle Bearbeitung grösser Menge von Daten können eine tiefe Kenntnis des geometrischen Oberbauzustandes erlauben. Aber es müssen auch Unregelmässigkeiten über die tatsächliche Masse und Gestaltung der Gleisgeometrie in Kauf genommen werden, was wegen Messunregelmässigkeiten und nicht immer angemessenen Bewertungskriterien geschieht.

Kombinierung von Messmethoden und verschiedene Bewertungskriterien erlauben die obengenannten Spannen vorteilhaft zu begrenzen.

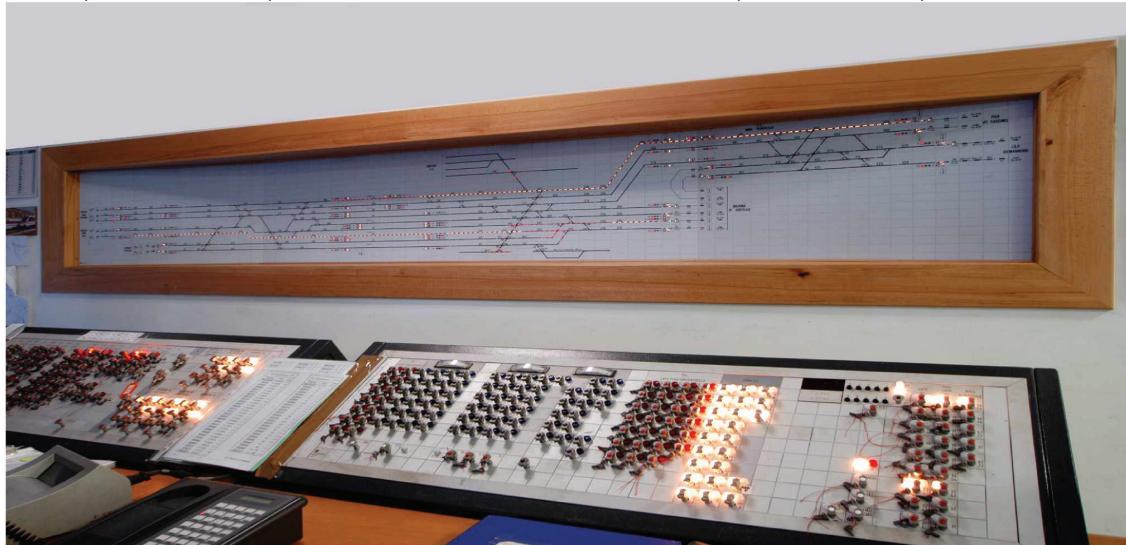
Nach einer kurze Zusammenfassung der jüngsten Messgerätfortschritten werden Gedanken über heutigen Bewertungsmethoden entwickelt, die in Aussicht befriedigenden Ergebnissen erwarten lassen, auch im Fall von NBS.



S.p.A.

Sede Legale e Direzione Generale
Via del Tuscolano 15 – Bologna
Tel. 051/329111 Fax.051/321106

Divisione Ferroviaria (ex DLK Srl)
Via della Chimica 3 – Ozzano dell'Emilia (BO)
Tel. 051/794820 Fax.051/794821



Realizzazione apparati di sicurezza, impianti di Blocco Automatico a correnti codificate e impianti di telecomunicazioni per Ferrovie e Metropolitane.

Fornitura di componenti e dispositivi per la sicurezza ferroviaria.