

# **MONITORAGGIO ELETTROMAGNETICO AMBIENTALE NELLE BANDE ULF-ELF-VLF (0.001 Hz – 100 kHz)**

## 1. INTRODUZIONE

Il progetto MEM si prefigge lo scopo primario di dare vita ad una rete di rilevamento dei campi elettromagnetici nella banda 0.001 Hz – 100 kHz.

Il progetto coinvolge diversi partner istituzionali quali la Regione Abruzzo, la Regione Molise (ARPA), l'INGV, l'Università di Ferrara, l'Università di Tirana, l'Istituto geofisico di Belgrado, e mira ad avere un impatto proprio nella diffusione dei risultati delle ricerche sia nell'ambiente scientifico sia al pubblico.

La realizzazione di una rete di monitoraggio permanente costituisce lo strumento di base per conoscere l'ambiente elettromagnetico in cui viviamo. Il carattere innovativo di questo progetto è individuabile nell'approccio scelto per affrontare il complesso problema di rappresentare la distribuzione spaziale e temporale dei campi elettromagnetici, in tutta la banda di interesse, attraverso parametri indicativi che includono la localizzazione e la caratterizzazione delle sorgenti naturali e artificiali che concorrono alla formazione del rumore di fondo ambientale, mediante l'interferometria a larga banda.

Questa tecnica consiste nella combinazione di osservazioni simultanee del campo elettromagnetico ambientale effettuate in più stazioni di misura distribuite sulla superficie terrestre. Le misure interferometriche consentono di ottenere informazioni dettagliate sulla struttura delle sorgenti elettromagnetiche.

## 2. FINALITÀ DEL PROGETTO

Il principale obiettivo concreto del progetto è la costituzione di 3 osservatori permanenti nell'Italia Centrale e la realizzazione di un sito WEB del progetto (<http://www.progettomem.it>). Questo sito sarà il supporto operativo e strutturato per la diffusione delle informazioni e dei risultati delle attività svolte in seno al progetto.

L'esperienza maturata nei primi due anni di attività durante i quali è stata sviluppata la tecnologia necessaria per la realizzazione dei 3 osservatori permanenti ha avuto come ricaduta produttiva l'industrializzazione della strumentazione di misura da parte di un'azienda italiana (vedi appendice1). La tecnologia sviluppata si presta ad essere impiegata anche in altri ambiti della ricerca in particolare nel campo della prospezione elettromagnetica dell'interno della Terra con le tecniche di magnetotellurica e geomagnetic deep sounding (GDS).

Uno dei temi del progetto è la messa a punto di modelli e strategie per giungere alla separazione dei segnali prodotti dalle sorgenti interne alla Terra dal fondo elettromagnetico presente sulla superficie terrestre.

Nella cavità Terra-ionosfera sono presenti una quantità di segnali naturali e artificiali prodotti da un numero enorme di sorgenti il cui spettro si estende per oltre 12 decenni nel dominio della frequenza e di 14 decenni nel dominio dell'energia.

I temi sviluppati in questo progetto possono essere sintetizzati in quattro punti:

- 1) sviluppo tecnologico;
- 2) indagini sulle manifestazioni elettromagnetiche di origine interna alla Terra;
- 3) caratterizzazione del rumore elettromagnetico di fondo;

4) studio dei fenomeni elettromagnetici che hanno origine nella magnetosfera, nella ionosfera e nella cavità Terra-ionosfera.

Per poter abbracciare tutte queste tematiche, data la molteplicità dei parametri da misurare e la complessità dei meccanismi fisici da studiare, è necessario che il rumore intrinseco dell'interferometro proposto sia inferiore al livello dei segnali magnetici naturali più deboli che si intendono esplorare. La densità spettrale dei segnali naturali più deboli è dell'ordine di  $5-10 fT / \sqrt{Hz}$  nella banda medio-alta dello spettro di indagine. La strumentazione sviluppata presenta un rumore di fondo dell'ordine di  $1-2 fT / \sqrt{Hz}$  nella banda LF (>30 kHz).

Considerata inoltre la grande variabilità dei campi magnetici coinvolti che può spaziare per ben 14 decenni in energia e 7 decenni in ampiezza, è stato adottato un convertitore analogico digitale con una dinamica di 24 bit.

### 3. ATTUAZIONE DEL PROGETTO

Per il monitoraggio continuo del fondo elettromagnetico nella banda 0.001 Hz-100 kHz è in corso lo sviluppo di una rete interferometrica permanente sul territorio della regione Abruzzo e della Regione Molise che potrà essere ulteriormente espansa, nelle fasi successive del progetto, all'intero territorio delle due Regioni fino a coprire una estensione di 90.000 km quadrati. Nella prima fase verranno realizzati 3 osservatori permanenti distribuiti nell'Italia Centrale: L'Aquila (AQU), Barete (BAR) e Duronia (DUR). In ognuno di questi osservatori verranno misurate le tre componenti del campo magnetico, le tre componenti del campo elettrico e le due componenti del campo tellurico. Questa configurazione è necessaria per separare i campi artificiali di origine locale dai campi elettromagnetici naturali e i campi di origine interna da quelli di origine esterna alla Terra.

L'approccio con tecniche interferometriche consente tra l'altro di determinare le funzioni di trasferimento tra i siti di misura che tengono in conto della struttura di conducibilità elettrica del sottosuolo nei tre osservatori. Queste informazioni costituiscono la base per realizzare i modelli tramite i quali è possibile identificare campi elettromagnetici anomali di origine interna alla Terra.

Lo scopo di questo progetto è quello di realizzare la tomografia elettromagnetica ambientale che ha come prodotto finale la rappresentazione della distribuzione dei campi elettromagnetici nel dominio del tempo, nel dominio della frequenza e nel dominio dello spazio. Questa tecnica costituisce un potente strumento di indagine per ottenere mappe tridimensionali, su scala regionale, del rumore elettromagnetico di fondo. Le mappe tomografiche oltre a riportare la distribuzione spaziale delle sorgenti elettromagnetiche, caratterizzano i segnali emessi dalle sorgenti mediante una serie di parametri quali l'energia, la polarizzazione, le proprietà statistiche e il contenuto spettrale.

L'attività svolta nella seconda fase di attuazione del progetto, dopo lo sviluppo tecnologico e la costituzione della prima stazione di misura, si è articolata principalmente intorno a tre temi: studio delle matrici spettrali, della divergenza del vettore di Poynting e del tensore elettromagnetico.

### 4. INTERFEROMETRIA A LARGA BANDA

L'interferometria è una tecnica osservativa utilizzata in diversi campi della Fisica, come nella radioastronomia e nell'ottica. L'interferometria radioastronomica si basa sulla misura simultanea, in punti differenti, del segnale emesso da una radiosorgente e lo studio delle frange di interferenza prodotte nella rete di misura. I punti di misura vengono disposti secondo una appropriata geometria. Questa tecnica consente di ottenere molte più informazioni di quanto consentano le misure da singoli punti.

L'interferometria radioastronomica si basa sulle seguenti assunzioni:

- 1) la sorgente può essere considerata puntiforme;
- 2) la distanza tra la sorgente e i punti di osservazione è molto più grande della distanza tra i punti di osservazione;
- 3) la lunghezza d'onda dei segnali è molto più piccola delle dimensioni della rete osservativa;
- 4) gli osservatori si trovano sempre nel campo lontano (far field);
- 5) le proprietà dei segnali misurati non vengono alterate dal contesto elettromagnetico terrestre;
- 6) I segnali vengono osservati attraverso una finestra frequenziale molto stretta.

Da queste assunzioni ne deriva che i segnali registrati nei punti di misura sono praticamente identici, soltanto la loro fase è differente. L'elaborazione dei segnali consiste nella correlazione incrociata dei segnali ricevuti nei singoli punti di misura. I segnali misurati possono essere associati all'energia totale oppure alle tre componenti del campo elettrico delle emissioni delle radiosorgenti. Lo studio delle ampiezze e delle fasi consente di eseguire l'analisi interferometrica.

Nell'interferometria a larga banda e a bassa frequenza (ULF-ELF-VLF), le assunzioni sopra esposte vengono capovolte:

- 1) le sorgenti naturali sono prevalentemente estese e le loro dimensioni sono molto più grandi o comparabili con le dimensioni della rete rivelatrice;
- 2) la distanza tra le sorgenti e le stazioni di misura sono dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni della rete interferometrica;
- 3) la lunghezza d'onda dei segnali è, per gran parte dello spettro investigato, molto più grande della rete;
- 4) gli osservatori si trovano sempre nel campo vicino (near field);
- 5) le proprietà dei segnali elettromagnetici misurati vengono considerevolmente modificate dal contesto elettromagnetico terrestre;
- 6) I segnali vengono osservati in una banda di frequenze estremamente ampia.

La conseguenza di queste assunzioni è che una data sorgente elettromagnetica viene "percepita" in ciascuno dei punti di osservazione in maniera differente. Questa diversità riguarda le proprietà fisiche della sorgente e le caratteristiche dei segnali emessi dalla sorgente quali le proprietà spettrali e statistiche. Ciò è dovuto principalmente all'interazione dei segnali con la cavità Terra-ionosfera. Le proprietà fisiche dei bordi della cavità rivestono un ruolo fondamentale. Queste sono soggette a variazioni spaziali e temporali considerevoli, pertanto segnali osservati nello stesso istante ma in punti spazialmente distinti sono diversi quand'anche gli osservatori fossero disposti simmetricamente rispetto alla sorgente. D'altro canto, misure effettuate in un singolo punto di osservazione ma in tempi differenti, risultano diverse anche se i segnali manifestano proprietà stazionarie associate ad una costante di tempo più lunga del periodo di osservazione.

Gli obiettivi principali di questo progetto sono la realizzazione della tomografia elettromagnetica dell'area investigata e la caratterizzazione delle sorgenti elettromagnetiche responsabili dei campi che vengono rivelati dalla rete interferometrica. Il primo obiettivo viene affrontato mediante la ricostruzione del campo all'interno del territorio delimitato dalla rete applicando il teorema integrale di Cauchy. Le misure effettuate sul bordo del dominio territoriale vengono interpolate in modo da ottenere una funzione continua sul perimetro limitato dai punti di osservazione della rete interferometrica. Le armoniche principali vengono ricostruite mediante funzioni olomorfe nel dominio della frequenza partendo dai due tensori densità spettrale relativi ai campi elettrico E e al magnetico H.

Queste funzioni sono complesse, ma applicando il teorema integrale di Cauchy permettono di ricostruire la distribuzione del campo all'interno del dominio.

Si opera sulle funzioni  $\mathbf{G}(\Delta t_i, \Delta f_{ji}, s)$  che rappresentano la generica componente del campo elettrico e del campo magnetico. Queste funzioni  $\mathbf{G}(\Delta t_i, \Delta f_{ji}, s)$  sono relative alle 6 componenti delle grandezze elettriche e magnetiche misurate, in cui  $\Delta t_i$  rappresentano gli intervalli temporali in cui viene suddiviso il record giornaliero dei dati. In ciascuno degli intervalli  $\Delta t_i$  vengono effettuate le trasformate i-esime di Fourier.  $\Delta f_{ji}$  rappresentano le bande j-esime relative alla i-esima

trasformata effettuata nell'intervallo  $i$ -esimo  $\Delta t_i$ ,  $s$  è la coordinata curvilinea sul percorso di integrazione intorno al perimetro del dominio, ovvero intorno all'area geografica delimitata dalle stazioni di misura.  $s$  è ovviamente funzione della latitudine e della longitudine.

Il secondo punto viene affrontato partendo dal dimensionamento della finestra temporale attraverso la quale vengono effettuate le elaborazioni dei segnali. Tale scelta si basa sulle proprietà statistiche dei segnali osservati. È necessario che per ciascuna classe di fenomeni venga scelta una finestra avente caratteristiche di "stazionarietà locale", considerato che il rumore em di fondo presenta un elevato grado di non stazionarietà. Lo studio delle sorgenti si basa essenzialmente sull'analisi frequenziale del tensore elettromagnetico nella banda 1 Hz – 100 kHz. Da questo tensore vengono calcolati una serie di parametri in funzione del tempo, della frequenza e dello spazio: la Lagrangiana del campo elettromagnetico, l'impedenza d'onda, il vettore di Poynting e i 15 elementi invarianti del tensore em. Nella banda inferiore invece (0.001 Hz – 100 Hz) l'analisi riguarda lo studio del tensore impedenza dell'interno della Terra, le funzioni di risposta impulsiva del sottosuolo e la separazione dei segnali di origine interna alla Terra dal fondo che si misura sulla superficie terrestre.

L'Acquisizione dei dati è quindi scissa in due bande: nella banda 0.001 Hz – 100 Hz e nella banda 1 Hz – 100 kHz. Nella prima banda vengono registrati direttamente i dati campionati, nella seconda banda il software di acquisizione esegue in tempo reale la trasformata di Fourier delle sei componenti del campo, con risoluzione di 1 Hz. Con queste trasformate viene costruito il tensore elettromagnetico  $T_{6 \times 6}$ ; con i 4 minori del tensore vengono realizzate 2000000 matrici spettrali  $3 \times 3$  ogni 10 minuti.

## 5. RUMORE ELETTROMAGNETICO DI FONDO

Nella banda di frequenze che si estende da un millesimo di ciclo al secondo fino a 100000 cicli al secondo si manifestano una grande varietà di fenomeni elettromagnetici naturali che hanno accompagnato l'umanità attraverso i millenni. Per milioni di anni queste radiazioni non hanno subito apprezzabili cambiamenti; tutti gli esseri viventi sono comparsi e si sono evoluti in presenza di questa radiazione di fondo. Soltanto nel secolo scorso le emissioni artificiali hanno iniziato a sommarsi a questo fondo elettromagnetico.

Il fondo elettromagnetico naturale, osservabile in qualunque punto della superficie terrestre, è dato dalla sovrapposizione di una quantità di segnali prodotti da un numero enorme di sorgenti distribuite nella cavità Terra-ionosfera, nella magnetosfera, nella ionosfera e all'interno della Terra. Questo fondo permea lo spazio compreso tra la superficie terrestre e la ionosfera interagendo in maniera complessa con le due superfici che limitano la cavità. Alcuni di questi segnali sono:

- 1) modi di oscillazione libera delle cavità magnetosferica (0.001 Hz – 0.01 Hz);
- 2) modi di risonanza della cavità alfvénica (0.1 Hz 10 Hz);
- 3) modi di risonanza longitudinale della cavità Terra-ionosfera (6 Hz – 50 Hz);
- 4) fenomeni risonanza onda-particella trasversale (risonanza ciclotronica) e longitudinale (risonanza Cerenkov, 1 kHz – 20 kHz);
- 5) emissioni legate a processi vari di instabilità nel plasma magnetosferico e ionosferico (0.001Hz – 100 kHz);
- 6) segnali elettromagnetici associati al transito di meteore nell'atmosfera (300 Hz – 30 kHz);
- 7) emissioni associate a impulsi radio di origine atmosferica (1 kHz – 100 kHz);
- 8) emissioni che accompagnano gli impulsi gamma atmosferici (6 kHz – 50 kHz);
- 9) emissioni dovute a "sprite", "blue jet", "red flash" ecc. nell'alta atmosfera (2 kHz – 60 kHz);
- 10) emissioni secondarie generate da onde magnetoidrodinamiche prodotte all'interno della magnetosfera, eccitate da transienti em artificiali e naturali (10 Hz – 20 kHz);
- 11) emissioni prodotte dalle esplosioni nucleari (200 Hz – 10000 Hz);

- 12) emissioni associate a fenomeni tettonici e vulcanici (0.001 Hz – 1000 Hz);
- 13) segnali di risonanza trasversale della cavità Terra-ionosfera (800 Hz – 5000 Hz).

Nel corso dell'ultimo secolo si è avuta una proliferazione caotica dei segnali elettromagnetici artificiali in cui siamo immersi quotidianamente e il cui impatto sull'ecosistema non è ancora stato chiarito ed è oggetto di indagine da diversi anni. Negli ultimi decenni è andata sempre più aumentando la popolazione esposta stabilmente all'azione di campi elettromagnetici artificiali che, nelle aree intensamente urbanizzate e industrializzate, possono essere molto più intensi dei campi naturali. Le principali sorgenti artificiali, la cui banda di frequenze si sovrappone a quella dei segnali naturali, sono le linee ferroviarie, i sistemi metropolitani di trasporto su rotaie (metro, tram, filobus) gli impianti di distribuzione dell'energia elettrica, gli impianti industriali, ecc.. Queste sorgenti, per la loro estensione spaziale, interessano vaste aree intensamente popolate. Poi ci sono i sistemi locali di piccola estensione spaziale i cui effetti sono limitati alle aree domestiche; questi sono rappresentati da quella quantità di oggetti tecnologici di uso quotidiano diffusi oramai su scala continentale.

Il rumore elettromagnetico di fondo si è arricchito di questi segnali artificiali al punto da coprire una parte dei segnali naturali. Discriminare le sorgenti naturali diventa un problema che in alcuni casi è di una complessità insuperabile. La scelta dei siti di misura richiede quindi una preventiva conoscenza del livello di fondo artificiale locale attraverso una campagna di prospezione effettuata sul territorio.

Il rumore di fondo naturale misurato sulla superficie terrestre è dominato dal fondo atmosferico prodotto dall'insieme delle scariche elettriche che hanno luogo sull'intera superficie terrestre al ritmo di circa 60-100 al secondo con una estensione spettrale vastissima, da qualche Hz fino a diversi MHz con un massimo intorno a 300 kHz. Lo spettro intrinseco di ciascun evento viene deformato dalla presenza della cavità Terra-ionosfera, in pratica si osservano diverse finestre spettrali, la prima con un massimo intorno a 8 Hz con le relative armoniche che giungono fino a 45 Hz (risonanza Schumann), la seconda nella banda 900 Hz 5000 Hz (risonanza trasversale), la terza nella banda centrata tra 5 kHz e 12 kHz e altre meno significative per i nostri obiettivi, come quella HF e ottica, in quanto cadono al di fuori della banda di indagine. Se si prende in considerazione una singola scarica atmosferica, lo spettro osservato dipende soprattutto dalla distanza sorgente-osservatore. Da vicino ciò che si osserva è lo "spettro – sorgente", da lontano si osserva il prodotto di convoluzione della "funzione – sorgente" con la funzione di trasferimento della cavità Terra – ionosfera. Mentre il primo osservatore vede un massimo intorno a 300 kHz, il secondo lo vede intorno a 7 kHz.

## 6. SORGENTI ELETTROMAGNETICHE

Le sorgenti elettromagnetiche, dal punto di vista dell'estensione spaziale possono essere classificate in:

- dipoli elementari puntiformi
- dipoli elementari estesi
- multipoli ibridi estesi
- multipoli ibridi puntiformi

queste sorgenti, dal punto di vista della natura intrinseca possono essere:

- magnetici
- elettrici
- ibridi

dal punto di vista spettrale:

- sorgenti termiche
- sorgenti colorate
- sorgenti complesse

dal punto di vista statistico:

- gaussiane
- isotrope
- stazionarie
- impulsive
- omogenee

In natura possono presentarsi combinazioni varie di tutte queste schematizzazioni.

Inoltre una data sorgente osservata in punti diversi può manifestare proprietà completamente differenti.

Vi sono anche sorgenti magnetiche non irradianti o quasi (QNR), molto diffuse in natura, in cui il campo magnetico rimane confinato nel volume della sorgente, tipico esempio sono le sorgenti toroidali (sorgenti dinamo nella magnetosfera, nella ionosfera e nel nucleo terrestre). Le sorgenti estese complesse in generale possiedono quasi sempre una componente toroidale. Queste componenti non sono accessibili mediante misure effettuate lontano dalla sorgente, nel senso che non è possibile determinare il bilancio energetico del sistema attraverso misure esterne al sistema. In realtà ciò che si misura sono soltanto le componenti poloidali delle sorgenti. Queste componenti, nel caso di sorgenti molto estese, di dimensioni maggiori della lunghezza d'onda dominante, producono campi elettrici e magnetici la cui lunghezza di correlazione spaziale e temporale riflette le proprietà di coerenza della sorgente legate ai processi di genesi dei campi.

Nella zona reattiva si riesce quasi sempre a trovare il legame tra la coerenza spaziale e temporale dei campi misurati e la coerenza spaziale e temporale del sistema di correnti che generano tali campi.

Infine vi sono sorgenti naturali le quali vengono attivate da segnali artificiali. Spesso uno stesso segnale artificiale si manifesta in due bande di frequenza completamente diverse e distanti tra di loro (figure 1.1 e 1.2). I segnali relativi alle due bande risultano provenire da direzioni opposte: la superficie terrestre e la ionosfera. Ad esempio i grandi sistemi di trasmissione e di trasformazione dell'energia elettrica possono dare luogo a fenomeni di risonanza locale nella magnetosfera producendo segnali di origine magnetosferica caratterizzati da righe spettrali distanziate di 100 Hz (figura 1.2).

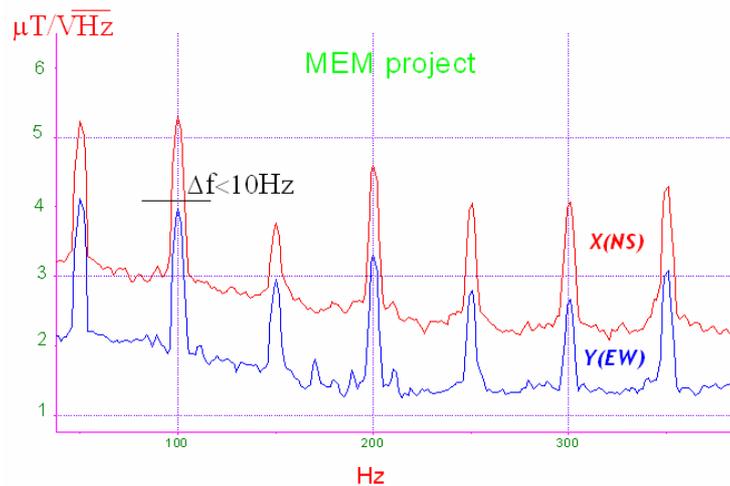


Figura 1.1 - Armoniche prodotte dalla rete di distribuzione dell'energia elettrica

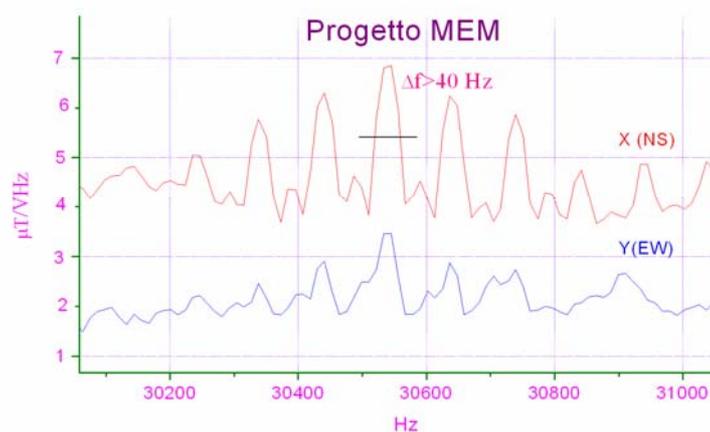


Figura 1.2 - Armoniche di rete che hanno interagito con il plasma magnetosferico

Le armoniche dei 50 Hz penetrano nella ionosfera e si propagano nella magnetosfera fino a giungere nella plasmasfera equatoriale, seguendo le linee di forza del campo magnetico terrestre, dove subiscono un processo di amplificazione. Questi segnali appaiono, all'osservatore a terra, essere emessi da una superficie molto ampia che è costituita dal bordo inferiore della ionosfera. L'impedenza d'onda dei segnali misurati riflette le proprietà di tale superficie, questa risulta essere molto più bassa dell'impedenza del vuoto.

I segnali che giungono in tale zona devono superare il livello di soglia al di sopra della quale si innescano i processi di risonanza ciclotronica onda-particella che è di circa 2 pT.

Le righe spettrali dei segnali magnetosferici differiscono da quelli terrestri per la larghezza delle righe: mentre le armoniche terrestri presentano una larghezza di pochi Hz, quelle di origine magnetosferica sono caratterizzate da un allargamento di 20-60 Hz (figura 2). Un altro esempio sono le emittenti HF di grande potenza che possono eccitare, nella bassa ionosfera, segnali nella banda ELF/VLF mediante il riscaldamento locale del plasma. I transienti nei grandi sistemi di

potenza possono stimolare la magnetosfera e la ionosfera producendo tutta una serie di fenomeni di risonanza onda-particella, oltre ad eccitare i modi di risonanza della cavità Terra-ionosfera.

Il campo elettromagnetico emesso da una sorgente attiva o scatterato da un oggetto passivo è sempre caratterizzato dal campo di propagazione e dal campo induttivo. Il campo evanescente lo si osserva nelle immediate vicinanze della sorgente, il campo di propagazione si osserva lontano dalla sorgente;

lontano e vicini è in relazione con la lunghezza d'onda che si considera e con la dimensione della sorgente. Vi è anche da considerare la lunghezza di coerenza della sorgente. In queste testo si assume il caso più semplice in cui la lunghezza di coerenza coincide con la dimensione della sorgente. Il campo vicino contiene utili informazioni sulla natura della sorgente. Come interpretare le informazioni ottenute con la misura del campo prossimale è una questione piuttosto complessa ed è uno dei temi che verranno sviluppati in questo progetto.

E' usuale considerare lo spazio intorno alla sorgente elettromagnetica suddiviso in 4 regioni in funzione della distanza sorgente-osservatore  $d$  e della dimensione della sorgente  $D$ :

1.  $d < \lambda/2\pi$  -zona prossimale (campo reattivo)
2.  $\lambda/2\pi < d < D^2/4\lambda$  -zona di Fresnel 1
3.  $D/4\lambda < d < 2D^2/\lambda$  -zona di Fresnel 2
4.  $d > 2D^2/\lambda$  -zona di Fraunhofer.

Nella regione 1 non si ha irradiazione (l'energia rimane localizzata nell'intorno della sorgente), il vettore di Poynting è immaginario in quanto  $E$  e  $H$  sono in opposizione di fase e si attenua con l'inverso della quinta potenza della distanza; in realtà vi è sempre una piccola componente reale. Questo piccolo contributo reale ci consente di vedere le sorgenti da lontano. La configurazione spaziale della perturbazione elettromagnetica è estremamente complessa e dipende essenzialmente dalle caratteristiche della sorgente. L'energia all'interno della sfera di raggio  $r \approx \lambda/2\pi$  viene mutuamente scambiata con la sorgente. Sorgente e spazio circostante risultano permanentemente accoppiati (figure 1.3 e 1.4). L'impedenza d'onda è un tensore complesso.

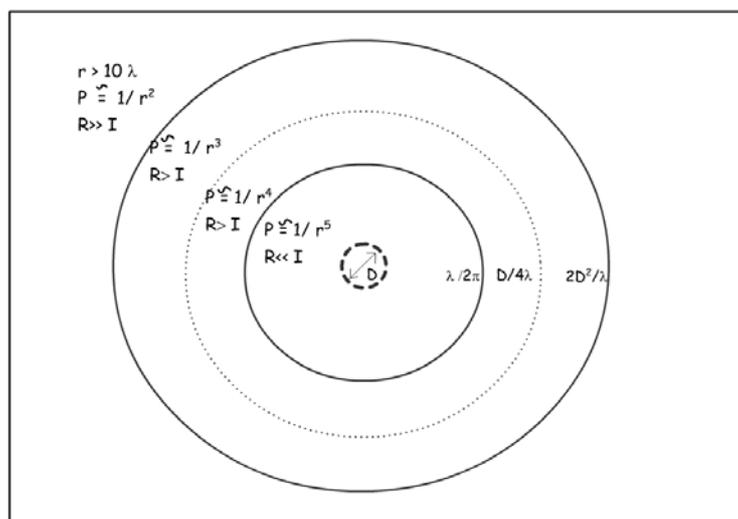


Figura 1.3 - Schematizzazione dello spazio che circonda una sorgente elettromagnetica di estensione  $D$  da cui inizia la zona reattiva, a seguire vi è la zona di Fresnel 1 e Fresnel 2 e, in ultimo, troviamo la zona di Fraunhofer o radiativa

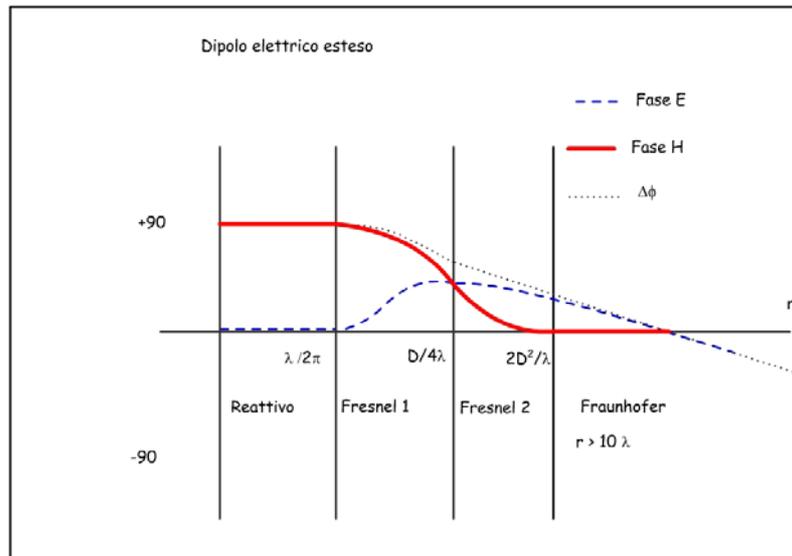


Figura 1.4 - Fase dei campi E e H per un dipolo elementare esteso

La natura del campo è sostanzialmente capacitiva nel caso in cui la struttura radiante possieda le caratteristiche del dipolo elettrico, viceversa è sostanzialmente induttiva quando la struttura radiante è assimilabile ad un dipolo magnetico. Se l'antenna è assimilabile ad un dipolo elettrico si ha

$$E / H > 377 \Omega$$

con il campo elettrico che decresce con il cubo della distanza, mentre il campo magnetico decresce con il quadrato della distanza. Se l'antenna è assimilabile ad un dipolo magnetico si ha:

$$E / H < 377 \Omega$$

con gli andamenti dei campi che sono invertiti rispetto al caso precedente.

Nella regione 2 la componente immaginaria di P è maggiore della componente reale, P si attenua con l'inverso della quarta potenza della distanza. L'impedenza d'onda non è ancora definibile. Tale regione si estende fino a una distanza r detta di Rayleigh.

Nella regione 3 la componente reale di P è maggiore della componente immaginaria, P si attenua con l'inverso del cubo della distanza. La componente reale dell'impedenza d'onda è maggiore di quella immaginaria. In questa regione non si hanno le condizioni di onda piana poiché prevalgono le interferenze dovute alle geometrie delle antenne e, non vi è relazione costante tra le fasi e tra le intensità dei vettori elettrico e magnetico. La determinazione della densità di potenza S in un punto richiede la misura vettoriale della fase e dell'ampiezza di entrambi i campi. La misura scalare di entrambi i campi non consente quindi di determinare l'esatto valore della densità di potenza "S"  $W/m^2$ , tuttavia tale valore può in alcune circostanze essere accettato poiché è comunque conservativo, dato che la densità di potenza sarà comunque minore della densità di potenza in condizioni di onda piana e quindi di campi ortogonali.

$$S \leq |\mathbf{E}| \wedge |\mathbf{H}|$$

Si introduce quindi il concetto di densità di potenza di onda piana equivalente  $S_{eq}$ , come il valore di densità di potenza che verrebbe trasportata dall'onda piana in cui i campi elettrico e magnetico hanno ampiezza uguale a quella misurata separatamente in condizioni di campo vicino radiativo.

$$S_{eq} = |\mathbf{E}| \wedge |\mathbf{H}|$$

Nella regione 4 le componenti radiali di H e E sono praticamente nulle, la componente zenitale del campo elettrico è legata alla componente azimutale del campo magnetico attraverso una semplice relazione scalare, l'impedenza del mezzo  $\frac{E_\theta}{H_\phi}$ , che non dipende dalle caratteristiche della

sorgente, dipende soltanto dalle proprietà fisiche del mezzo in cui si propaga l'onda.

Il vettore di Poynting è sempre reale in quanto le componenti sono sempre in fase e si attenua con il quadrato della distanza. In tutti e 4 i casi il vettore di Poynting ha una frequenza doppia rispetto a quella dei campi e una componente continua che è nulla soltanto nel quarto caso.

Nella regione di campo radiativo lontano la perturbazione elettromagnetica assume localmente le caratteristiche dell'onda piana, con distribuzioni uniformi del campo elettrico e del campo magnetico. Il campo elettrico ed il campo magnetico sono fra loro mutuamente ortogonali, mantengono in ogni istante la relazione di fase in quadratura e oscillano ortogonalmente alla direzione di propagazione. la permanenza della relazione di fase in quadratura, determina che si mantenga costante nel tempo e nello spazio il rapporto  $\eta$  (impedenza dell'onda) tra i moduli delle intensità dei due campi, cioè che valga la relazione:

$$\eta = \frac{E}{H} = 377 \Omega.$$

Dal punto di vista delle tecniche di misura la condizione di campo lontano, e quindi di onda piana, permette di effettuare le sole rilevazioni di campo elettrico (di campo magnetico) per ottenere l'informazione di campo magnetico (di campo elettrico) e di densità di potenza. Questa però è una schematizzazione che non risulta adeguata quando si studiano le sorgenti a larga banda nella zona reattiva. In realtà il campo elettromagnetico varia spazialmente con continuità. Le relazioni di fase tra E e H sono anch'esse dipendenti da  $r$ . A titolo d'esempio, in figura 4, è riportata le fase dei campi E e H per un dipolo elementare esteso al variare di  $r$ . L'energia prodotta da una sorgente elementare puntiforme può essere rappresentata mediante uno sviluppo in serie della funzione  $1/r$ :

$$W = \left[ \frac{k_{1e}}{r} \left( \frac{d^2 S}{dt^2} \right) + \frac{k_{2e}}{r^2} \left( \frac{dS(t)}{dt} \right) + \frac{k_{3e}}{r^3} S(t) + \dots \right] \cdot \left[ \frac{k_{1m}}{r} \left( \frac{d^2 S}{dt^2} \right) + \frac{k_{2m}}{r^2} \left( \frac{dS}{dt} \right) + \frac{k_{3m}}{r^3} S(t) + \dots \right]$$

(S(t) è la funzione sorgente,  $k_e$  e  $k_m$  sono costanti che inglobano le caratteristiche fisiche e geometriche del dipolo in funzione di  $r$ )

Possiamo considerare una sfera di raggio  $r$  con il centro coincidente con la sorgente, l'energia totale distribuita sulla superficie S è data da:

$$W_{tot} = 4\pi \left[ k_{1e} k_{1m} \left( \frac{d^2 S}{dt^2} \right)^2 + \frac{k_{1e} k_{2m}}{r^2} \left( \frac{d^2 S}{dt^2} \right) \left( \frac{dS(t)}{dt} \right) + \frac{k_{1e} k_{3m}}{r^3} \left( \frac{d^2 S}{dt^2} \right) S(t) + \dots \right]$$

Il termine costante  $k_{1e} k_{1m}$ , indipendente dalla scelta del raggio della sfera, rappresenta l'energia impressa dai generatori presenti all'interno della sorgente. I termini non costanti rappresentano il contributo reattivo che è tanto più intenso quanto più si è vicini alla sorgente. Questa rappresentazione è più realistica rispetto alle usuali schematizzazioni.

## 7. SORGENTI INTERNE ALLA TERRA

Il monitoraggio elettromagnetico dei processi geodinamici si basa su due aspetti distinti:

- 1) cambiamenti nel tempo della struttura di conducibilità elettrica del sottosuolo dovuti a variazioni dello stress tettonico a cui sono sottoposte le rocce nelle aree sismogenetiche;
- 2) emissioni di campi elettromagnetici dovute a diversi meccanismi di trasformazione di energia meccanica in energia elettromagnetica. Questi meccanismi dipendono dalla struttura e dalla natura delle rocce.

Il punto 1 viene affrontato mediante il monitoraggio continuo delle funzioni di trasferimento e degli elementi del tensore impedenza. Per quanto riguarda il punto 2 bisogna considerare la natura della sorgente em ipogeica, la valutazione dello spettro intrinseco e, attraverso le funzioni di risposta impulsiva del sottosuolo, dello spettro osservabile in superficie.

In letteratura sono presenti numerosi lavori sulle anomalie elettromagnetiche associate a eventi sismici che riportano osservazioni in una banda di frequenze estremamente ampia che si estende dai mHz fino ai MHz. La banda 0.001 Hz – 1000 Hz viene attribuita a processi lineari, mentre alla banda superiore possono essere associati processi non lineari nella trasformazione di energia meccanica in energia em.

Tuttavia considerata l'attenuazione del mezzo attraversato dai segnali e.m. è ragionevole prevedere di poter osservare sulla superficie terrestre segnali nell'estremo inferiore della banda, 0.001 Hz – 1000 Hz. Questo dovrebbe essere l'intervallo di frequenze su cui focalizzare le indagini in quanto i segnali possono, sotto certe condizioni, raggiungere la superficie terrestre con ampiezze sufficienti da consentirne la discriminazione dal rumore di fondo e.m. In questa banda di frequenze la propagazione dei segnali elettromagnetici deve essere trattata in termini di diffusione anche all'esterno della Terra, in quanto siamo nella banda al di sotto della frequenza di cut-off minima di cavità per i modi TM e TE.

Un'altra banda di interesse è quella nota come "dead band" che si estende da 1 kHz fino a 5 kHz.

In questa banda si ha una elevata attenuazione nel sottosuolo dovuta alle caratteristiche dei materiali attraversati, nel contempo si ha un basso livello del rumore ambientale in quanto tale banda coincide con quella relativa ai modi di risonanza trasversale di cavità.

Poiché i segnali di origine interna non si propagano nella cavità, questi possono essere osservati soltanto in prossimità della sorgente.

Il campo misurato sulla superficie terrestre è dato dalla sovrapposizione del campo sorgente, del campo indotto dall'interazione del campo sorgente con l'interno della Terra e dal campo di origine interna alla Terra. Per affrontare il problema della separazione dei campi la cui genesi sia nel sottosuolo si assumono alcune semplificazioni che si riassumono nella seguente rappresentazione:

$$\begin{pmatrix} E_{Xm} \\ E_{Ym} \\ E_{Zm} \\ H_{Xm} \\ H_{Ym} \\ H_{Zm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} & T_{45} & T_{46} \\ T_{51} & T_{52} & T_{53} & T_{54} & T_{55} & T_{56} \\ T_{61} & T_{62} & T_{63} & T_{64} & T_{65} & T_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_{Xi} \\ E_{Yi} \\ E_{Zi} \\ H_{Xi} \\ H_{Yi} \\ H_{Zi} \end{pmatrix}$$

Il legame tra le funzioni sorgente e il campo misurato è dato dal tensore T (6x6) che rappresenta le proprietà dell'interno della Terra, in cui il pedice *m* si riferisce alla grandezza misurata, con il pedice *i* sono indicati i segnali di ingresso al sistema T.

Così posto il problema non vi sono soluzioni concrete in quanto non sono conoscibili tutte le funzioni sorgente.

Una relazione ulteriormente semplificata, con le seguenti condizioni al contorno:  
 $E_{xi}=E_{yi}=E_{zi}=H_{zi}=0$ , è data dalla seguente espressione:

$$\begin{pmatrix} E_{xm} \\ E_{ym} \\ E_{zm} \\ H_{xm} \\ H_{ym} \\ H_{zm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 & T_2 \\ T_3 & T_4 \\ T_5 & T_6 \\ T_7 & T_8 \\ T_9 & T_{10} \\ T_{11} & T_{12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} H_{xi} \\ H_{yi} \end{pmatrix}$$

In cui il campo sorgente è rappresentato dalla sola componente orizzontale del campo magnetico. Gli unici minori del tensore T effettivamente calcolabili sono i seguenti:

$$H(\omega)_{zm} = T_{11}(\omega)H(\omega)_{xm} + T_{12}(\omega)H(\omega)_{ym}$$

$$\begin{pmatrix} E(\omega)_{xm} \\ E(\omega)_{ym} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1(\omega) & T_2(\omega) \\ T_3(\omega) & T_4(\omega) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_7(\omega) & T_8(\omega) \\ T_9(\omega) & T_{10}(\omega) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} H(\omega)_{xm} \\ H(\omega)_{ym} \end{pmatrix}$$

Dagli elementi di questi minori del tensore T, calcolati nel dominio della frequenza, vengono determinate le 6 funzioni “risposta impulsiva  $I_1(t), I_2(t), I_3(t), I_4(t), I_5(t), I_6(t)$ ”. Queste funzioni consentono di calcolare una delle incognite del problema mediante la convoluzione delle funzioni “risposta impulsiva” con i campi misurati:

$$H(t)_z = I_1(t) \otimes H(t)_{xm} + I_2(t) \otimes H(t)_{ym}$$

$$E(t)_x = I_3(t) \otimes H_{xm}(t) + I_4(t) \otimes H_{ym}(t)$$

$$E(t)_y = I_5(t) \otimes H_{xm}(t) + I_6(t) \otimes H_{ym}(t)$$

La differenza tra i campi misurati e le funzioni ricostruite fornisce il campo di origine interna:

$$H(t)_z - H(t)_{zm} = H_{zs}$$

$$E(t)_x - E(t)_{xm} = E_{xs}$$

$$E(t)_y - E(t)_{ym} = E_{ys}$$

Questi segnali differenza possono però essere stati generati anche sulla superficie terrestre vicino al punto di misura, i segnali prossimali non producono effetti induttivi rilevanti, il loro contributo nelle funzioni di risposta impulsiva è praticamente nullo, questi segnali compaiono nelle funzioni differenza. Per discriminare questa ulteriore ambiguità si applica, a questo campo residuo, il teorema della divergenza del vettore di Poynting. Gli algoritmi connessi con questo teorema forniscono la direzione di arrivo dei segnali residui, consentendo quindi di isolare il campo di origine interna alla Terra. Spesso però l’ambiguità direzionale non viene risolta in quanto anche il rumore locale appare essere emesso dal sottosuolo. Uno strumento di maggiore efficacia è costituito dal tensore elettromagnetico. I segnali sintetizzati vengono introdotti nel tensore al posto delle omologhe componenti, opportunamente normalizzati. Lo studio degli autovettori in funzione della frequenza consente di discriminare la componente interna dal rumore locale.

## 8. MODI DI RISONANZA DELLA CAVITÀ TERRA-IONOSFERA

La cavità Terra-ionosfera si comporta come un sistema risonante le cui frequenze sono legate alle dimensioni della cavità: la circonferenza massima della Terra di circa 40000 km e l'altezza Terra-ionosfera di circa 100 km (figura 1.5). Alla prima è associata una frequenza fondamentale longitudinale di 7.8 Hz, alla seconda è associata una frequenza fondamentale trasversale di 1700 Hz. L'insieme delle scariche elettriche atmosferiche e dei transienti artificiali di grande intensità che si producono sull'intera superficie planetaria eccitano i modi di risonanza longitudinale e trasversale della cavità producendo una radiazione di fondo quasi stazionaria e osservabile in qualunque punto della superficie terrestre: un segnale di fondo noto come segnale di risonanza Schumann (6 Hz – 45 Hz) e un segnale di risonanza trasversale (800 Hz – 5000 Hz).

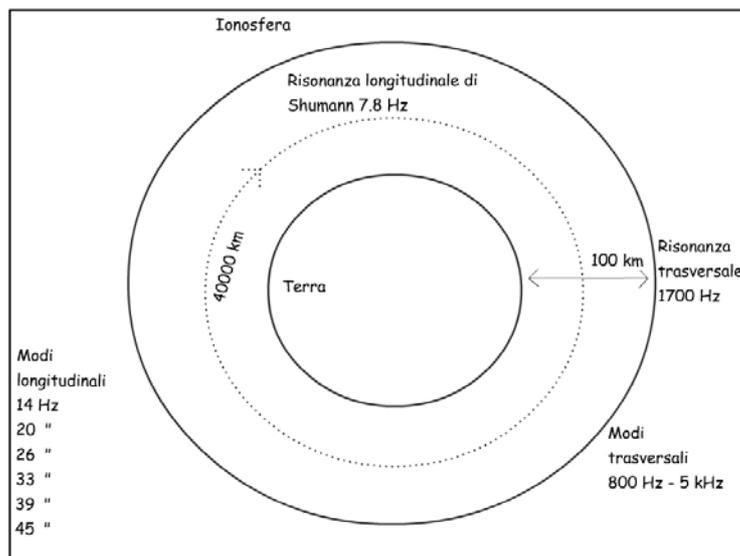


Figura 1.5- Modi di risonanza della cavità Terra-ionosfera

La radiazione Schumann è costituita da una componente quasi stazionaria la cui ampiezza è dell'ordine di 10-100 fT, e una componente impulsiva costituita da involucri quasi esponenziali molto più intensi, 0.1 –10 pT. La cui frequenza fondamentale e le sue armoniche sono soggette a piccole fluttuazioni, inferiori al 5%.

La componente stazionaria è dovuta al fatto che la frequenza media di ripetizione delle scariche atmosferiche è molto più grande della frequenza di risonanza, la componente non stazionaria è prodotta dalle scariche atmosferiche di grande intensità (>1 GW); a livello planetario si ha, statisticamente, un evento ogni secondo (figura 1.6). Nel grafico sono rappresentati i segnali di risonanza longitudinale della cavità Terra-ionosfera (risonanza Schumann) in essa sono visibili le due componenti che caratterizzano il fondo in questa banda di frequenze (7.5 Hz): la componente non stazionaria dovuta ai transienti di grande potenza (>1 GW) e la componente quasi stazionaria eccitata dalle scariche elettriche atmosferiche (100 al secondo)

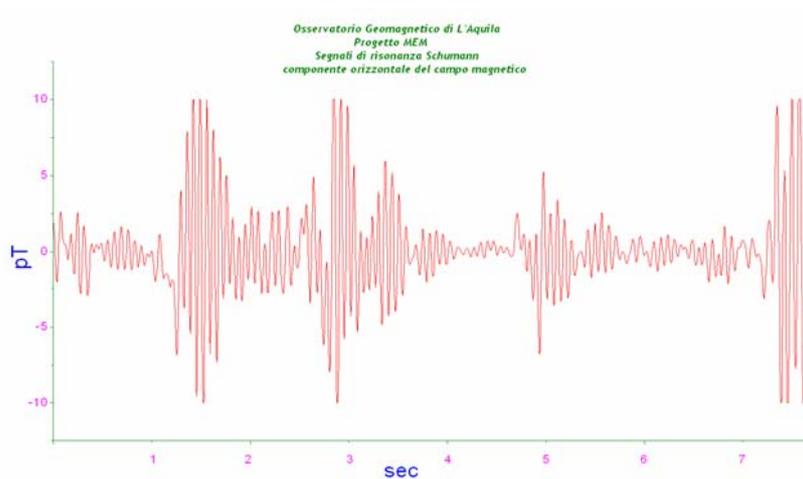


Figura 1.6 – Segnali di risonanza di Schumann

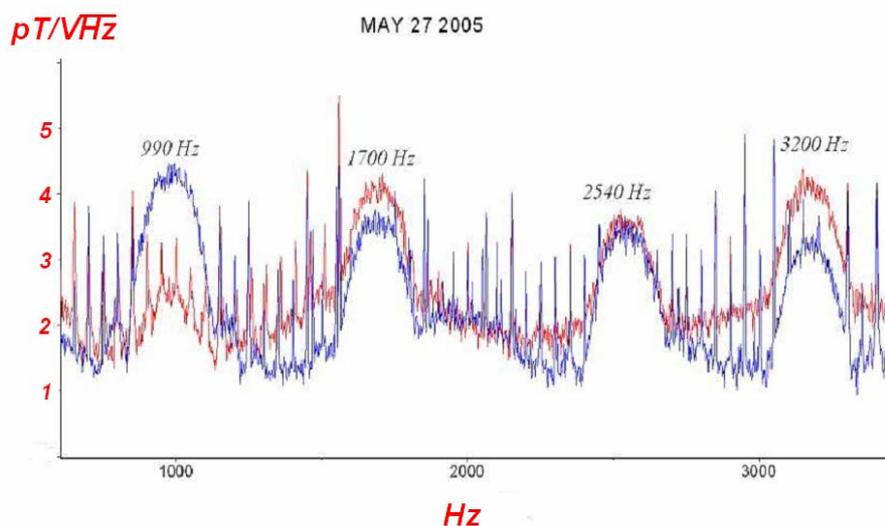


Figura 1.7 - Frequenze di risonanza trasversale della cavità Terra-ionosfera

I segnali relativi ai modi di oscillazione trasversale della cavità hanno una morfologia spettrale molto più complessa (figura 1.7) in quanto dipendono dalla struttura della ionosfera la quale è soggetta a continui cambiamenti influenzati principalmente dal sole sotto forma di due contributi: radiativo e particellare. Il contributo radiativo è dato dalla componente a più elevata energia della radiazione solare (raggi UV e raggi X) e il contributo particellare dovuto al vento solare (protoni, elettroni e ioni).

Le proprietà fisiche dei due bordi della cavità sferica rivestono una importanza fondamentale nella propagazione dei segnali. La ionosfera può essere considerata globalmente come un plasma freddo anisotropo e disomogeneo. Questa assunzione è valida fintantoché l'energia dell'onda incidente non sia tale da modificare le proprietà fisiche del plasma.

Nel caso delle scariche elettriche atmosferiche l'energia in gioco può essere talmente elevata da produrre cambiamenti locali nel plasma ionosferico eccitando modi propri di risonanza. In una cavità sferica isotropa il campo elettromagnetico può essere scisso in due modi di propagazione indipendenti: nel modo TE (trasversale elettrico) e nel modo TM (trasversale magnetico) oltre al

modo TEM. Poiché la ionosfera non è isotropa a causa del campo magnetico terrestre, questi modi di propagazione si accoppiano sul bordo inferiore della ionosfera.

Onde TM o TE incidenti danno luogo a riflessioni TE e TM. Nella cavità Terra-ionosfera non possono coesistere modi TE e TM indipendenti. I due modi sono caratterizzati da frequenze di cut-off multiple di  $c/2h$ : TM1= 1700 Hz, TM2=3400 Hz, TM3=5500 Hz, ecc. ( $h$  è l'altezza della ionosfera assunta per semplicità pari a 100 km) in corrispondenza delle quali la velocità di gruppo tende a zero  $V_{gn} = c\sqrt{1-(f_p/f)^2}$ . Per  $f$  uguale alla frequenza di plasma  $f_p$ , la velocità di gruppo  $V_g$  e l'impedenza d'onda  $Z_{TM}$  tendono a zero e l'impedenza d'onda  $Z_{TE}$  tende a infinito (figure 1.8 e 1.9).

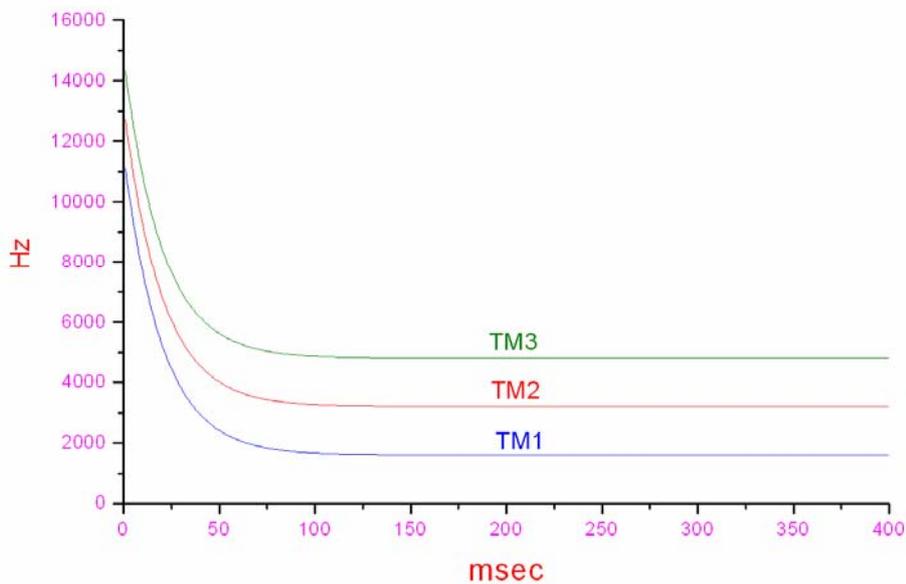


Figura 1.8 - Risposta impulsiva della cavità Terra-ionosfera

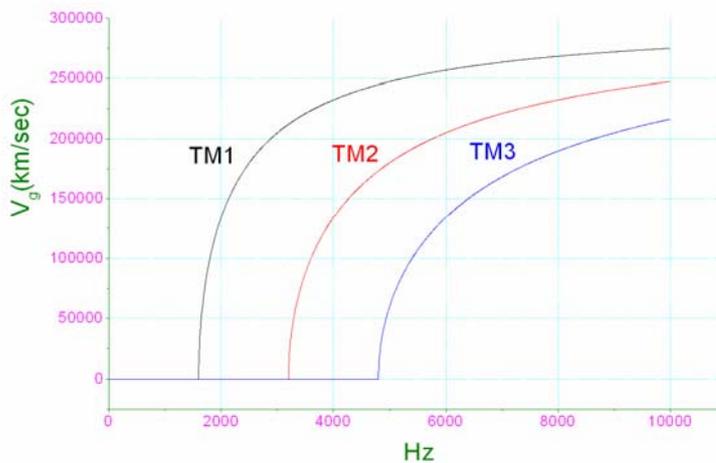


Figura 1.9 - Velocità di propagazione in funzione della frequenza dei modi TM

L'accoppiamento tra i due modi di propagazione implica che il coefficiente di riflessione nel bordo ionosferico è caratterizzato da una matrice 2x2 piuttosto che da uno scalare.

Il bordo inferiore della cavità è costituito dalla superficie terrestre che può essere considerato approssimativamente isotropo. La matrice di riflessione relativa al suolo ha i due elementi diagonali nulli.

In corrispondenza delle frequenze TM1, TM2, TM3 ecc si ha la massima attenuazione dei segnali (figura 1.10).

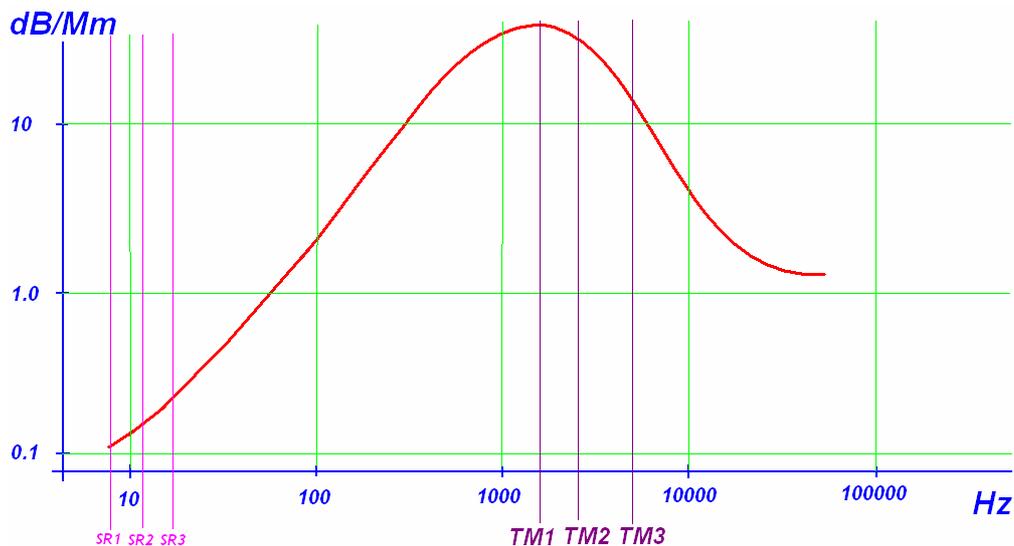


Figura 1.10 - Curva di attenuazione della cavità Terra - ionosfera

Poiché la velocità di gruppo a queste frequenze tende a zero, il rumore presente nella cavità permane nell'ambiente per un tempo maggiore rispetto a tutte le altre frequenze, pertanto è osservabile una serie di involucri in corrispondenza di tali frequenze. Queste frequenze dipendono dalla struttura della ionosfera, poiché questa è soggetta a variazioni temporali e spaziali, le frequenze di cut-off possono assumere diversi valori nello stesso istante, tali valori inoltre possono essere soggetti a variazioni nel tempo (tipica è la variazione giorno-notte). La misura di questi segnali può costituire un utile strumento di diagnosi della ionosfera (figura 1.11).

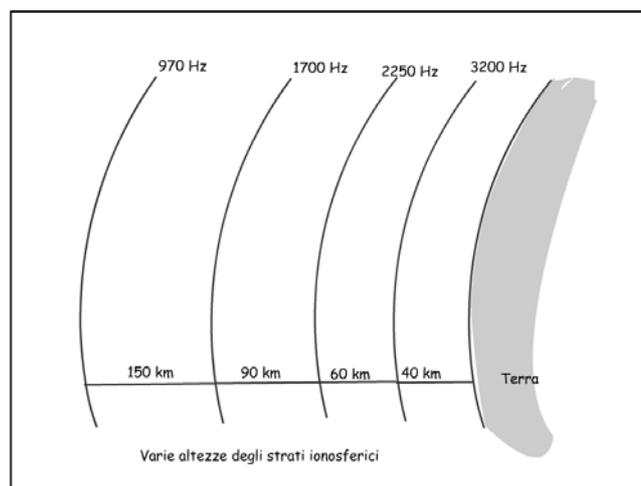


Figura 1.11- Modello semplificato della struttura della ionosfera dedotto dalle frequenze di risonanza trasversale

## 9. BILANCIO ENERGETICO DELLA CAVITÀ TERRA-IONOSFERA

La cavità Terra-ionosfera può essere considerata come un grande condensatore elettrico le cui armature sono costituite da due sfere concentriche, la Terra e la ionosfera (figura 1.12). La carica di questo condensatore rimane approssimativamente costante nel tempo. La condizione di equilibrio elettrostatico del sistema è garantita dai meccanismi fisici che consentono la continua rigenerazione del campo elettrico. Questi meccanismi sono i responsabili di gran parte del rumore elettromagnetico che si osserva sulla superficie terrestre e che permea l'intera cavità. Per mantenere carico questo condensatore è necessaria una potenza dell'ordine di 400 MW.

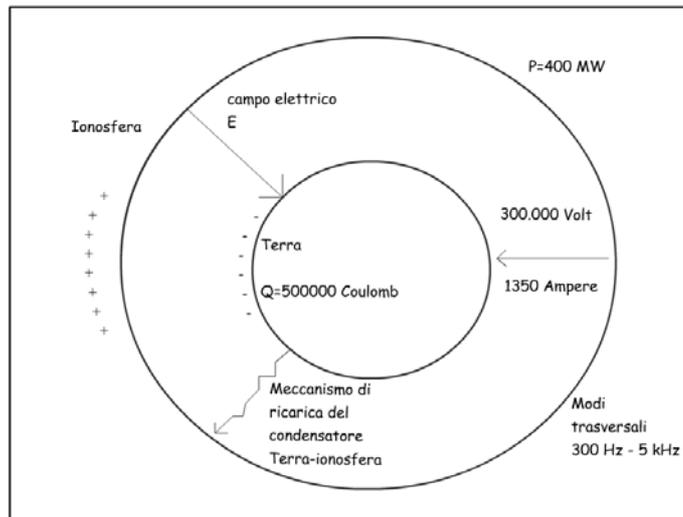


Figura 1.12- Equilibrio elettrostatico della cavità Terra-ionosfera

In condizioni di bel tempo il campo elettrico in prossimità della superficie terrestre ha un valore medio di circa 120 V/m a cui corrisponde una densità superficiale di carica di  $-1.2 \text{ pC/m}^2$ . Integrando questo valore su tutta la superficie terrestre si ottiene la carica totale negativa della Terra di 0.5 MC. Una carica uguale e di segno opposto è ovviamente presente sul bordo della ionosfera. Il campo elettrico atmosferico decresce esponenzialmente con la quota, a 10 km il campo si riduce a 5 V/m, a 30 km il campo è di soli 0.3 V/m. Integrando il campo elettrico dalla superficie terrestre fino alla ionosfera si ottiene la differenza di potenziale esistente tra Terra e ionosfera che è di circa 300 kV. Nell'atmosfera fluisce una corrente verticale la cui densità è di circa  $2 \text{ pA/m}^2$ , integrando tale valore della densità di corrente su tutta la superficie terrestre si ha una corrente totale di circa 1350 A che scorre tra la ionosfera e la superficie terrestre. Questa corrente di scarica è dovuta alla presenza di cariche elettriche che rendono l'atmosfera leggermente conduttrice. Alle quote basse la sorgente principale si trova sulla superficie terrestre e all'interno della Terra.

La crosta terrestre infatti contiene materiali radioattivi, principalmente Uranio, Torio e i loro prodotti di decadimento. I Raggi beta e gamma emessi dal suolo ionizzano le molecole di aria nei primi metri sopra il suolo. Il gas radioattivo Radon, uno dei prodotti di decadimento dell'Uranio 238, può diffondere nell'atmosfera fino a qualche decina di metri al di sopra del suolo prima che decada in Polonio emettendo particelle alfa. Pertanto il Radon è la principale causa di ionizzazione dell'aria fino ad altezze di diverse decine di metri sopra la superficie terrestre. Nonostante ciò la conducibilità elettrica dell'atmosfera vicino al suolo diminuisce perché gli ioni tendono a depositarsi sulle particelle di aerosol e di polvere. Queste particelle a causa della loro minore mobilità contribuiscono a ridurre la conducibilità elettrica dell'aria. Nelle zone con elevate concentrazioni di particolato nell'aria si hanno bassi livelli di conducibilità elettrica.

La seconda sorgente di ionizzazione è costituita dai raggi cosmici la cui efficacia è massima a 15 km di quota dove il massimo effetto ionizzante è dato dall'equilibrio tra i due parametri: densità dell'aria e intensità dei raggi cosmici, l'uno decresce e l'altro cresce con la quota. I raggi X e la radiazione ultravioletta sono la principale causa di ionizzazione dell'aria al di sopra di 60 km di quota. Questa dipende dalla latitudine geografica, dalle stagioni, dalle ore del giorno e dall'attività solare.

La conducibilità elettrica dell'aria aumenta inoltre con la latitudine a causa dell'aumento dell'intensità dei raggi cosmici alle latitudini più elevate.

A livello del suolo la densità di corrente subisce variazioni associate alle condizioni meteorologiche che producono migrazioni di cariche elettriche e quindi correnti di convezione. Alle variazioni temporali del campo elettrico terrestre sono associate le correnti di spostamento che rappresentano una parte non trascurabile della corrente totale nell'equilibrio del circuito elettrico globale. La corrente di spostamento ha la stessa variazione diurna della corrente di conduzione

Vicino al suolo il campo elettrico è soggetto a grandi variazioni legate principalmente alle condizioni meteorologiche locali. In condizioni di cielo sereno e di assenza di vento si osservano fluttuazioni del campo elettrico legate a fenomeni di altra natura, la cui banda si estende da frazioni di mHz (variazione diurna) fino a frequenze dell'ordine dei kHz. Il campo elettrico misurato a terra spesso risulta essere molto più basso di 120 V/m, anche questo effetto è dovuto alla radioattività naturale. La superficie terrestre ha una carica elettrica negativa, le cariche elettriche negative prodotte dal decadimento delle sostanze radioattive della crosta vengono spinte verso l'alto dal campo elettrico terrestre, mentre quelle positive si dirigono verso il basso, ciò dà luogo alla formazione di un campo elettrico opposto a quello terrestre. Si forma uno strato che si estende per un'altezza di diversi metri sopra la superficie terrestre all'interno del quale il campo elettrico terrestre raggiunge un valore di equilibrio molto più basso di quello previsto, in funzione del livello di produzione di cariche negative di origine crostale, passando da 120 V/m a 5-30 V/m.

L'attività elettrica planetaria associata ai temporali può essere considerata come la sorgente primaria dell'energia che alimenta il sistema elettrico Terra-ionosfera. Questo sistema agisce come un immane generatore ad energia solare, esso converte l'energia solare in energia elettrica.

Il calore del sole che determina l'evaporazione, dà luogo a gradienti termici verticali, necessari per l'ascesa del vapore. Le correnti convettive verticali generano l'elettrizzazione delle nubi producendo un campo elettrico opposto a quello quasi-statico del condensatore Terra-ionosfera, di diversi ordini di grandezza più intenso. Le scariche elettriche temporalesche caricano la superficie terrestre ripristinando la carica negativa persa a causa della scarica continua attraverso l'atmosfera. La potenza elettrica totale messa in gioco in questo enorme meccanismo di carica e scarica è di circa 400 MW. Durante una scarica elettrica temporalesca viene creato un canale conduttivo ad elevata temperatura lungo il quale scorrono correnti dell'ordine dei kA. Questo conduttore è costituito da gas allo stato di plasma caratterizzato da una conducibilità elettrica confrontabile con quella di un metallo. Per qualche frazione di secondo si forma un'antenna che irradia onde elettromagnetiche la cui frequenza dominante dipende dalla lunghezza del canale conduttivo che mediamente è di circa 1000 metri, a cui corrisponde la frequenza fondamentale di circa 300 kHz. In realtà il funzionamento di questa antenna è piuttosto complesso, poiché il canale non è assimilabile al solo dipolo elettrico, dato che la corrente che vi circola genera un intenso campo magnetico. Inoltre, il canale ionizzato determina il "congelamento" del campo magnetico terrestre intensificandolo a causa dei moti vorticosi del plasma.

Quando la scarica cessa e, il plasma si raffredda, si produce una ulteriore emissione di segnali ELF-VLF dovuta allo "strozzamento" locale del campo geomagnetico lungo il percorso della scarica.

La ionosfera viene caricata anche attraverso altri meccanismi, diversi e molto più complessi.

Al di sopra della quota dei temporali, nell'atmosfera media dove l'aria è estremamente rarefatta, hanno luogo diversi fenomeni elettromagnetici, stimolati indirettamente dall'attività elettrica delle

nubi, quali red sprites, elves, blu jets, impulsi radio ARB ( Atmospheric Radio Bursts) e impulsi gamma di origine atmosferica TGF (Terrestrial Gamma Flashes ) che in diversa misura contribuiscono a caricare elettricamente la ionosfera. Queste manifestazioni oltre a emettere nella banda propria, ottica, radio HF e gamma, hanno anche una coda spettrale nella banda ULF,ELF e VLF. Un ruolo importante si ritiene che abbiano i flussi di elettroni relativistici nella produzione di tali manifestazioni. Questi flussi vengono prodotti dal campo elettrico presente al di sopra delle nubi dove l'aria è più rarefatta. Gli elettroni vengono accelerati, lungo le linee di forza del campo geomagnetico, dal campo elettrico estremamente intenso presente al di sopra delle nubi elettrizzate, questi interagiscono con i neutri dell'atmosfera producendo un frenamento delle cariche accelerate (bremsstrahlung) producendo impulsi gamma TGF (Terrestrial Gamma ray Flashes)

“Red Sprites” sono emissioni ottiche nella regione dello spettro corrispondente al rosso, si manifestano tra i 40 e i 90 km di altitudine e sono associati a scariche elettriche atmosferiche che avvengono tra la sommità delle nubi e la ionosfera. Queste scariche hanno caratteristiche assai diverse dai fulmini in quanto l'aria è estremamente rarefatta. Le emissioni gamma sono transienti la cui durata è dell'ordine del millisecondo. Gli impulsi radio atmosferici sono caratterizzati da una energia centinaia di volte più intensa delle radio emissioni dovute alle scariche elettriche. Hanno origine tra 5 e 20 km di altitudine al di sopra di grandi temporali. Lo spettro di questi fenomeni si estende tra 20 MHz e 200 MHz. La loro durata è estremamente breve, può variare da qualche microsecondo fino a 100 microsecondi, perciò sono di difficile osservazione. Le scariche atmosferiche, in particolare quelle di grande potenza (>1GW), possono produrre condizioni di instabilità nel plasma ionosferico e magnetosferico inducendo tutta una serie di fenomeni, meglio noti con i loro acronimi:

AKR (Auroral Kilometric Radiation) 20 kHz – 2 MHz  
NTC (Non Thermal Continuum) 500 Hz 10 kHz  
NCR (Non Continuum Radiation) 200 Hz - 100 kHz  
TNCR (Trapped Non Continuum Radiation) 500 Hz 20 kHz  
EW (Electron Whistlers) 100 Hz – 18 kHz  
PW (Proton Whistlers) 0.1 Hz – 20 Hz  
VLF HISS 10 Hz - 100 kHz  
GM (Geomagnetic Micropulsation) 0.001 Hz - 5 Hz  
ICW (Ion Cyclotron Whistlers) 10 Hz – 700 Hz  
ICWA (Ion Cyclotron Waves) 5 Hz – 100 Hz  
MNB (Magnetic Noise Bursts) 10 Hz – 600 Hz  
SR (Schumann Resonance) 6 Hz – 50 Hz  
ET (Electron Tweaks) 1-6 kHz  
PT (Proton Tweaks) 1-10 Hz  
TMR (Terrestrial Miriametric Radiation) 1-100 kHz

L'intensità dei segnali associati a queste manifestazioni naturali, osservate sulla superficie terrestre, variano da 10 fT fino a 100 nT. In gran parte vengono stimulate e modulate anche dalla componente particellare della radiazione solare (il vento solare). Questi segnali si propagano all'interno del plasma magnetosferico e ionosferico come onde magnetoidrodinamiche, che rimangono confinate come tali in queste regioni in quanto non possono propagarsi nel vuoto o nell'atmosfera neutra. Quando giungono sui bordi della discontinuità, il bordo inferiore della ionosfera o il bordo esterno della magnetosfera, questi segnali vengono riemessi dalla superficie di discontinuità sotto forma di onde elettromagnetiche e quindi possono essere osservate a terra.

La condizione essenziale affinché l'energia possa sfuggire dal plasma magnetosferico e ionosferico verso lo spazio interplanetario e verso la Terra è che le onde magnetoidrodinamiche nel plasma si

propagano nel modo ordinario e straordinario al di sopra delle rispettive frequenze di cut-off. Alla frequenza angolare locale del plasma  $\omega_p$  per i modi ordinari e alla frequenza

$$\omega = \frac{1}{2} \left\{ \omega_g + \left[ \omega_g^2 + 4\omega_p^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

Per i modi straordinari.

( $\omega_g$  è la frequenza giromagnetica dell'elettrone e  $\omega_p$  è la frequenza angolare di plasma)

Le emissioni coinvolgono condizioni di instabilità che generano microturbolenze le quali rimangono confinate nelle regioni di plasma. La radiazione che si propaga all'esterno è il risultato di interazioni non lineari nel plasma.

Questi processi di generazione di onde producono diverse componenti, la più importante è la componente fondamentale alla frequenza di plasma quando la frequenza della perturbazione dovuta alla instabilità locale è molto inferiore a quella di plasma,  $\omega_i \ll \omega_p$ ;

## 10. ELABORAZIONE DEI DATI

Il primo tema affrontato riguarda il rilevamento dei segnali attraverso una finestra temporale avente caratteristiche di "stazionarietà locale", considerato che il rumore em di fondo presenta un elevato grado di non stazionarietà. La scelta di questa finestra di osservazione condiziona naturalmente la classe di fenomeni osservabili.

L'Acquisizione dei dati è scissa in due bande: nella banda 0.001 Hz – 100 Hz e nella banda 1 Hz – 100 kHz. Nella prima banda vengono registrati direttamente i dati campionati, nella seconda banda il software di acquisizione esegue in tempo reale la trasformata di Fourier delle sei componenti del campo, con risoluzione di 1 Hz. Con queste trasformate viene costruito il tensore elettromagnetico T; con i 4 minori hermetiani del tensore vengono costruite 50000 matrici spettrali 6x6 ogni 10 minuti.

$$T = \begin{array}{c} \left( \begin{array}{ccc|ccc} \langle H_x H^*x \rangle & \langle H_x H^*y \rangle & \langle H_x H^*z \rangle & \langle H_x E^*x \rangle & \langle H_x E^*y \rangle & \langle H_x E^*z \rangle \\ \langle H_y H^*x \rangle & \langle H_y H^*y \rangle & \langle H_y H^*z \rangle & \langle H_y E^*x \rangle & \langle H_y E^*y \rangle & \langle H_y E^*z \rangle \\ \langle H_z H^*x \rangle & \langle H_z H^*y \rangle & \langle H_z H^*z \rangle & \langle H_z E^*x \rangle & \langle H_z E^*y \rangle & \langle H_z E^*z \rangle \\ \hline \langle E_x H^*x \rangle & \langle E_x H^*y \rangle & \langle E_x H^*z \rangle & \langle E_x E^*x \rangle & \langle E_x E^*y \rangle & \langle E_x E^*z \rangle \\ \langle E_y H^*x \rangle & \langle E_y H^*y \rangle & \langle E_y H^*z \rangle & \langle E_y E^*x \rangle & \langle E_y E^*y \rangle & \langle E_y E^*z \rangle \\ \langle E_z H^*x \rangle & \langle E_z H^*y \rangle & \langle E_z H^*z \rangle & \langle E_z E^*x \rangle & \langle E_z E^*y \rangle & \langle E_z E^*z \rangle \end{array} \right) \end{array}$$

Il tensore sopra riportato è così composto: nel quadrante a sinistra in alto vi è la componente magnetica, nel quadrante a destra in basso vi è la componente elettrica, gli altri due rappresentano il vettore di Poynting.

Per trattare il tema della individuazione delle bande di frequenza riferibili a sorgenti discrete vengono elaborate le matrici in modo da raggrupparle in base a criteri di ortogonalità mediante il calcolo dei relativi autovalori e autovettori. Questo studio è di particolare interesse pratico perché

permette di stabilire, in base all'uniformità delle bande selezionate, qual è il numero minimo di sorgenti indipendenti che concorrono alla formazione del rumore misurato. Il secondo tema riguarda l'applicazione del teorema della divergenza del vettore di Poynting, analizzando la sottoclasse delle matrici selezionate in modo da valutare per ciascuna banda i 4 attributi energetici. La divergenza di P, nel dominio del tempo, è data dalla espressione:

$$\nabla \bar{P}(t) = \vec{H}(t) \nabla \times \vec{E}(t) - \vec{E}(t) \nabla \times \vec{H}(t)$$

Poiché la densità di corrente J si compone della corrente dovuta alle sorgenti e della corrente di conduzione. La prima è la corrente impressa dai generatori, la seconda è la corrente che scorre nel sistema fisico:

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_c = \vec{J}_s + \sigma \vec{E}$$

l'espressione della divergenza, nel dominio della frequenza, diviene:

$$\nabla \cdot \vec{P} = -j\omega\mu |\vec{H}|^2 + j\omega\varepsilon |\vec{E}|^2 - \vec{E} \cdot \vec{J}_s - \sigma |\vec{E}|^2$$

e i 4 contributi distinti sono:

-  $P = \iint_S (\vec{E} \otimes \vec{H}^*) dS$  è la potenza totale complessa che fluisce fuori della superficie S che circonda

la i-esima sorgente;

-  $P_r = \frac{1}{2} \text{Re} \iint_S (\vec{E} \otimes \vec{H}^*) dS$  è la parte reale della potenza che fluisce fuori di S;

$W_m = \frac{1}{2} \iiint_V \frac{1}{2} \mu |\vec{H}|^2 dV$  è l'energia magnetica media immagazzinata nel volume V in cui è confinata

l'i-esima sorgente;

-  $W_e = \frac{1}{2} \iiint_V \frac{1}{2} \varepsilon |\vec{E}|^2 dV$  è l'energia media associata al campo elettrico immagazzinata nel volume V

Inoltre,  $P_d = \frac{1}{2} \iiint_V \sigma |\vec{E}|^2 dV$  è il valore medio dell'energia dissipata in V, e  $P_s = -\frac{1}{2} \iiint_V (\vec{E} \cdot \vec{J}_s^*) dV$

è la potenza media liberata dalla sorgente presente in V.

Il bilancio energetico complessivo suggerisce che l'energia totale fornita dai generatori confinati all'interno della superficie di integrazione S deve eguagliare la somma dell'energia irradiata fuori dalla sorgente, di quella dissipata all'interno della sorgente e di quella immagazzinata nel volume V limitato da S:

$$P_s = P + P_d + 2j\omega(W_m - W_e)$$

Naturalmente  $P_d$  e  $P_s$  non sono direttamente accessibili alla misura senza interagire fisicamente con la sorgente. Anche le altre grandezze non sono esattamente conoscibili attraverso una misura puntuale in quanto occorrerebbe poter integrare le misure sulla superficie S, naturalmente nel campo lontano le cose sono semplificate.

Nel caso estremamente semplificato in cui la sorgente è costituita da un dipolo elettrico puntiforme, nella zona reattiva in cui  $r < \lambda/2\pi$  le componenti prevalenti sono:

$$E_r \approx -jZ_0 \frac{de^{-jkr}}{2\pi kr^3} \cos \theta$$

$$E_\theta \approx -jZ_0 \frac{de^{-jkr}}{4\pi kr^3} \sin \theta$$

$$H_\phi \approx \frac{de^{-jkr}}{4\pi r^2} \sin \theta$$

il vettore di Poynting diventa:

$$\vec{P} \approx (E_r \vec{v}_r + E_\theta \vec{v}_\theta) \otimes H_\phi^* = j \frac{Z_0}{k} d^2 \left[ \frac{2 \sin \theta \cos \theta}{r^5} \vec{v}_\theta - \frac{\sin^2 \theta}{2r^5} \vec{v}_r \right] e^{-jkr}$$

P è immaginario, rappresenta un sistema di onde stazionarie. E' un risultato irrealistico in quanto al di fuori della sfera S di raggio  $r \approx \lambda/2\pi$  il campo sarebbe nullo, non vi sarebbe irradiazione.

Ciò deriva dalla semplificazione nell'espressione del campo dovuto al dipolo, in realtà la descrizione di questi campi è molto più complicata, se venissero considerati anche gli altri termini mancanti si avrebbe anche una componente reale del vettore P che terrebbe conto dell'energia che attraversa la superficie S.

Questo tipo di analisi consente comunque di valutare approssimativamente i vari contributi energetici e di discriminare i segnali rispetto ai quali l'osservatore si trova nel campo vicino e nel campo lontano, nelle relative bande di frequenza. Tali bande devono essere sufficientemente strette in modo da ridurre l'effetto dovuto alla sovrapposizione di segnali di origine diversa.

Le dimensioni trasversali della cavità Terra-ionosfera sono, per gran parte dello spettro di interesse, più piccole della lunghezza d'onda dei segnali. La condizione di campo vicino è quindi prevalente. Nelle regioni "near field" il vettore di Poynting istantaneo ha una componente immaginaria che rappresenta la porzione di energia dei segnali che si propaga nella direzione della sorgente. E' come se lo spazio circostante scambiasse energia con la sorgente. La superficie che effettivamente appare emettere i segnali pare essere non quella coincidente con la sorgente fisica bensì quella corrispondente alla sfera di raggio  $r \approx \lambda/2\pi$ . All'esterno della quale P diviene reale al crescere della distanza.

Naturalmente nello studio del vettore di Poynting si assume che i campi E e H provengano da una sola sorgente, nel caso del rumore elettromagnetico naturale, nella banda di indagine, si è in presenza di una sovrapposizione di campi dovuti a innumerevoli sorgenti di natura ed estensione diverse. L'osservazione dei campi in bande di frequenza molto strette non sempre garantisce che E e H misurati provengano da una sola sorgente.

Il terzo tema riguarda lo studio del tensore elettromagnetico T nel dominio del tempo e della frequenza. L'analisi delle due componenti di questo tensore, la parte simmetrica e la parte antisimmetrica, consente di calcolare tutti i parametri relativi alla distribuzione del campo in 3D.

Lo studio della derivata del tensore elettromagnetico consente inoltre di separare le variazioni del campo elettromagnetico nelle due componenti: la componente che varia parallelamente al vettore elettrico e al vettore magnetico e le componenti non parallele. I quattro tensori rappresentativi due simmetrici e due antisimmetrici descrivono la morfologia e la dinamica dei segnali nel tempo e nella frequenza. I vantaggi di queste metodologie risiedono nel fatto che non è necessario operare a banda stretta in quanto è possibile analizzare contemporaneamente segnali provenienti da 2 o più sorgenti diverse. L'analisi del campo elettromagnetico ambientale conduce ineluttabilmente ad una rappresentazione della realtà fisica più o meno distorta in quanto i segnali si propagano all'interno

di una cavità risonante caratterizzata sia da modi di risonanza libera sia da frequenze di cutoff relative ai modi TM e TE. Una parte dell'energia elettromagnetica osservata appare essere generata dalle due superfici che limitano la cavità: la superficie terrestre e la ionosfera. Una ulteriore complicazione è data dalla presenza del campo geomagnetico e dalla circostanza che le due superfici sono ben lungi dall'essere conduttori perfetti, inoltre le loro proprietà elettromagnetiche variano spazialmente e temporalmente.

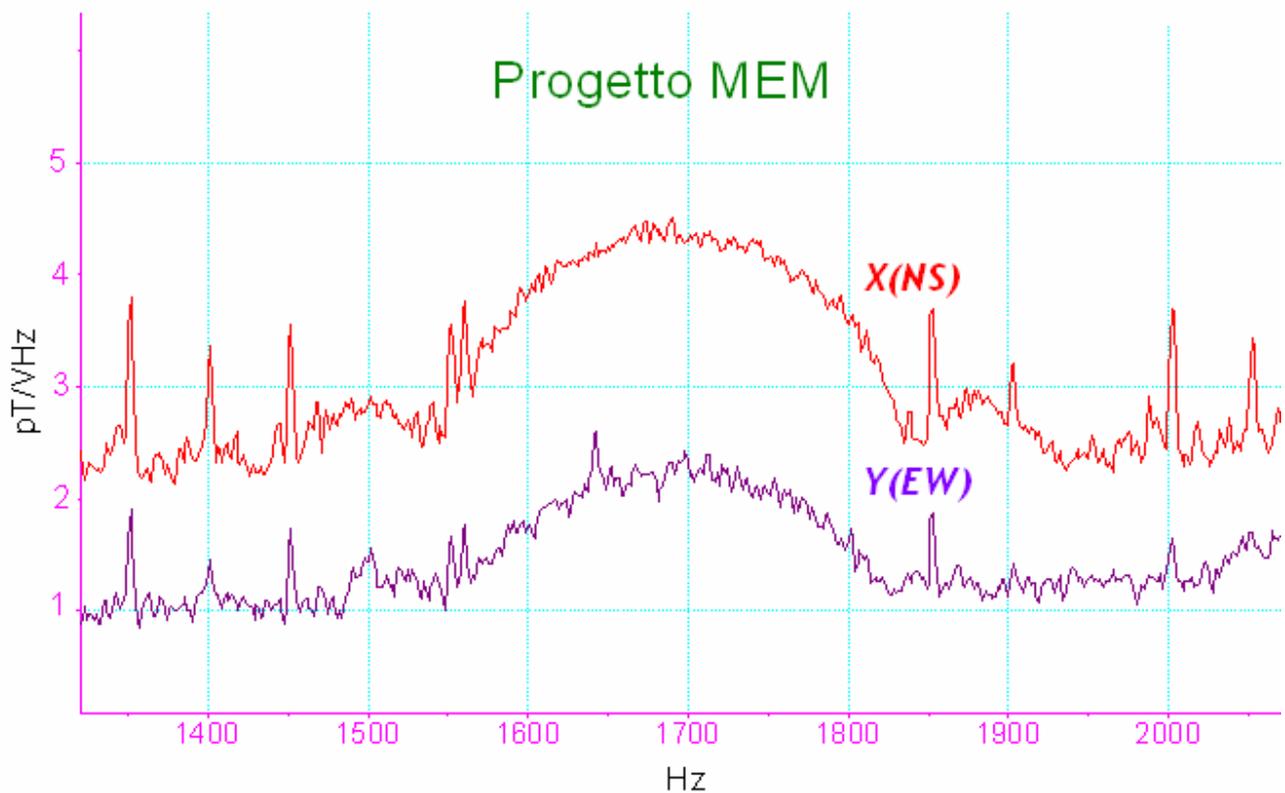


Fig. 1.13 - Esempio di sorgente estesa, si riferisce al modo di risonanza trasversale della cavità Terra-ionosfera, la sorgente è costituita da una vasta area della superficie inferiore della ionosfera.