

Geofisica Applicata

Scienze Geologiche

LM

Elettromagnetismo

A bassa ed alta frequenza

AA 2018-2019

# Il metodo geoelettromagnetico parte 01

## Metodi EM: introduzione

- a causa della necessità di utilizzare gli elettrodi per inviare corrente nel sottosuolo, l'uso del metodo della resistività elettrica (metodo galvanico) per l'investigazione di aree molto vaste è quasi impraticabile (elevato rapporto costi/benefici). Inoltre in certe aree (molto resistive) è molto difficile assicurare un buon contatto tra l'elettrodo ed il sottosuolo (p.es. studio dei ghiacciai)

- 1930/31 ==> SUNDBERG e ricercatori russi svilupparono i primi strumenti EM per ricerche minerarie,
- 1960 ==> periodo di inizio regolare come metodo geofisico indipendente

## Metodi EM: introduzione – induzione magnetica

- per questi motivi sono stati sviluppati altre tecniche (sempre determinano variazioni di resistività o meglio parlare di CONDUTTIVITA' ELETTRICA) che si basano SUL CONCETTO DELL'INDUZIONE ELETTROMAGNETICA.

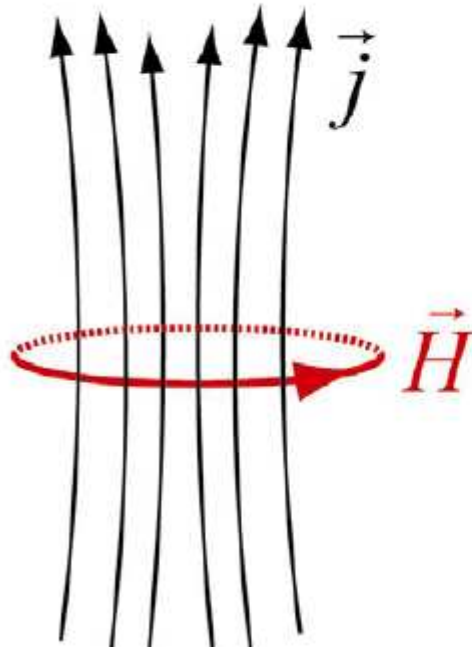
In tale modo:

- Ⓐ non si usano gli elettrodi
- Ⓑ aumenta la risoluzione spaziale
- Ⓒ si abbassa il rapporto costi/benefici
- Ⓓ Ricordare sempre che queste tecniche non godono della stessa risoluzione verticale dei metodi galvanici

Tuttavia ==>

# Metodi EM: concetti base – equazioni di Maxwell

Legge di Ampere

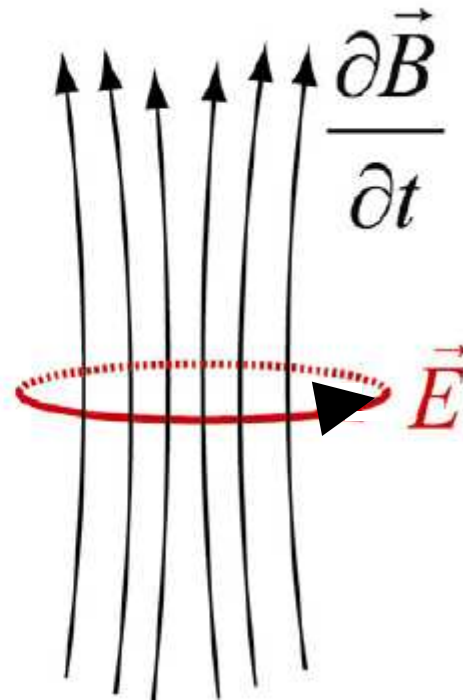


$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$\nabla = \text{rot} \mathbf{E}$

**J** - densità di corrente (conduzione) A/m<sup>2</sup>  
**D** - spostamento dielettrico (propagazione)

Legge di Faraday-Neumann  
campo **E** è generato da un c.m. variabile

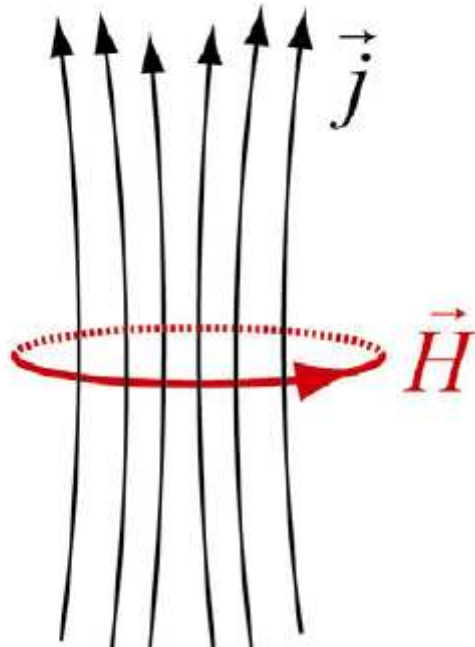


$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

ci dice che una variazione temporale del campo magnetico produce un campo elettrico<sup>5</sup>

# Metodi EM: concetti base – equazioni di Maxwell

Legge di Ampere



$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$\nabla = \text{rot} E$

**J** - densità di corrente (conduzione) A/m<sup>2</sup>

**D** - spostamento dielettrico (propagazione)

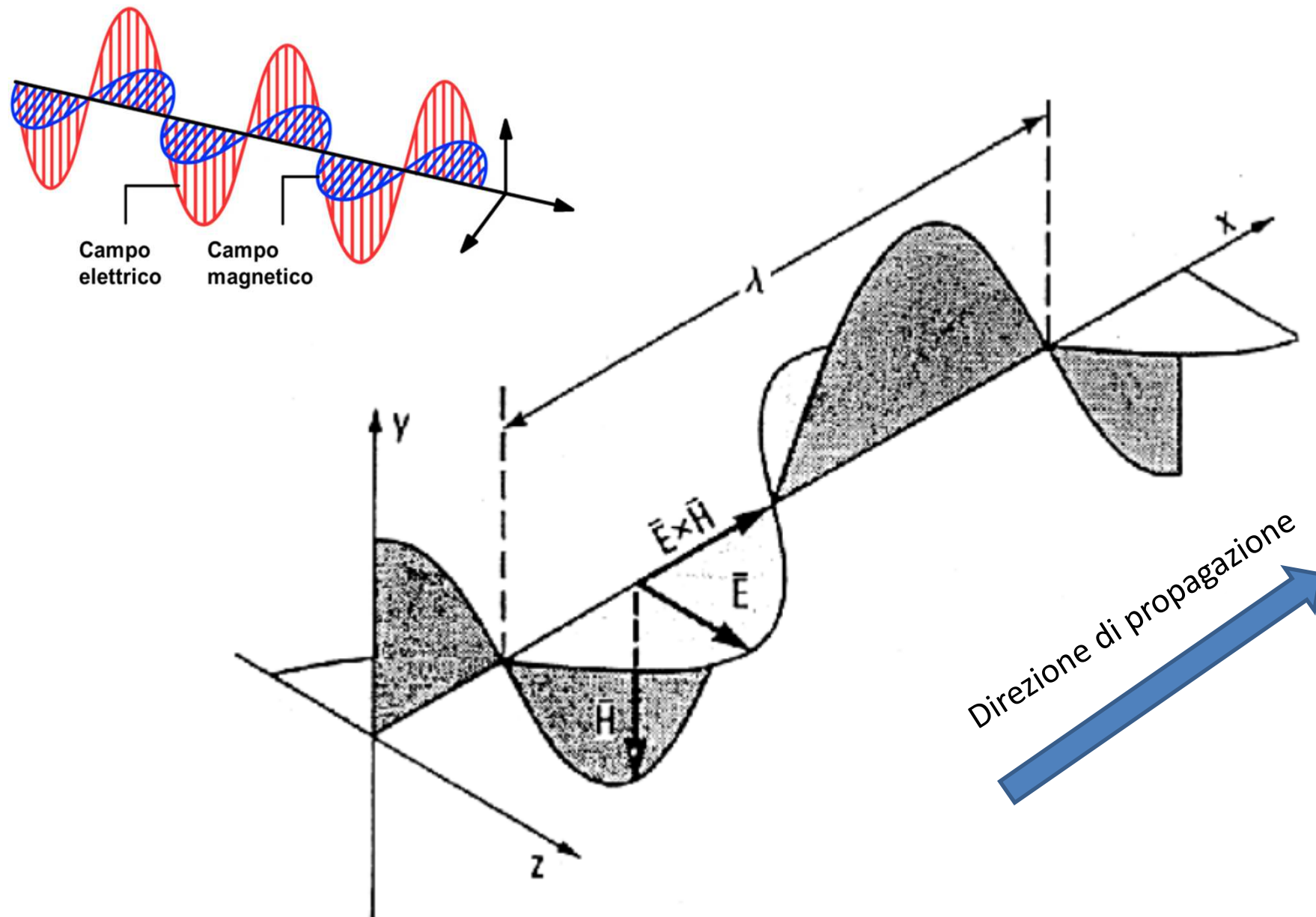
Una variazione nel tempo del campo magnetico produce un campo elettrico (**variabile nel tempo anch'esso**), ma anche un campo elettrico variabile nel tempo produce un campo magnetico.

Si produce in questo modo un fenomeno autoconsistente :

Le onde elettromagnetiche.

Tali onde possono propagarsi nel vuoto come anche in misura diversa in altri mezzi cioè a velocità diversa

Metodi EM: i vettori dei campi elettrici e magnetici sono perpendicolare alla direzione di propagazione



## Metodi EM: concetti base

i campi EM che investono i mezzi materiali dipendono dalle seguenti proprietà elettriche:

- Resistività elettrica
- Permeabilità magnetica
- Permittività dielettrica: è l'unica proprietà fisica che non può essere determinata senza l'impiego dei campi elettromagnetici

## Metodi EM: concetti base

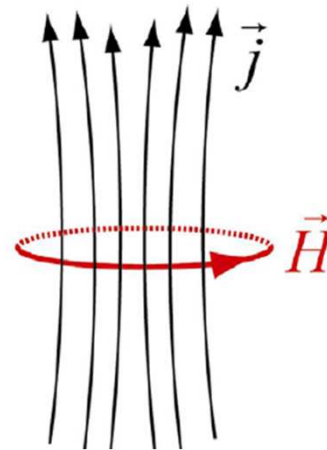
Nei mezzi omogenei ed isotropi valgono le seguenti relazioni costitutive

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}$$

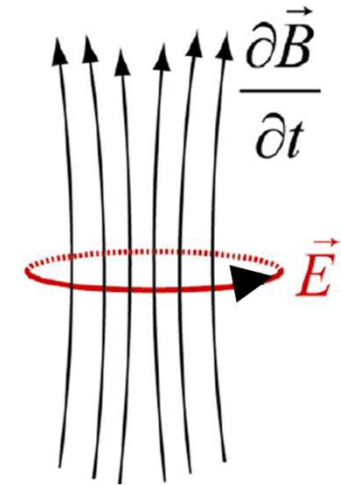
$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E}$$

Equazioni di Maxwell



$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$



$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$\mu_r = \mu / \mu_0$  : permeabilità magnetica relativa ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m)

$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0$  ( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m);  $s$  = conducibilità elettrica (Mohs/m o S/m)

# Metodi Elettromagnetici: sorgente utilizzata e banda di frequenza

Nome	sorgente	frequenza	parametro	applicazione principale
Very Low Frequency	Lontana (Tx radio)	singola	pendenza angolo	strutture lineari
Magnetotellurica MT/CSAMT	Passiva Attiva	Banda larga	E, B E, B, $\theta$	Sondaggi elettrici
<b>FDEM GCM (Ground Conductivity Meter)</b>	<b>Attiva (bobina)</b>	<b>Singola/multipla</b>	<b>B</b>	<b>Struttura sottosuolo superficiale</b>
<b>TEDM/TEM</b>	<b>Attiva (loop di grandi dimensioni)</b>	<b>Dominio tempo</b>	<b>dB/dt</b>	<b>Struttura sottosuolo profondo</b>
E: campo elettrico	B: campo magnetico	$\theta$ : fase	MT: magnetotellu	CS: sorgente controllata

# Metodi EM: concetti base – equazioni di Maxwell

## Legge di Faraday-Neumann

• Flusso Magnetico ( $\Phi_M$ ) [Magnetic flux]

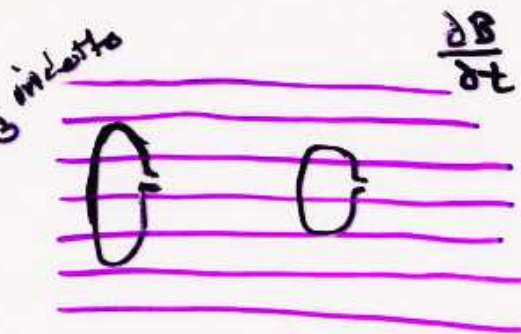
$\Phi_M$  legato ad una bobina di forma circolare è dato da:

$$\Phi_M = B \cdot A \cdot \sin(\theta)$$

ove:

B : intensità campo magnetico

A : Area della bobina



# Metodi EM: concetti base – equazioni di Maxwell

## Legge di Faraday-Neumann

$$\Phi_M = B \cdot A \cdot \text{sen}(\theta)$$

- Il flusso magnetico è funzione dell'angolo  $\alpha$  tra il piano della bobina e il campo (linee di forza)

$$\Phi_M \downarrow \textcircled{1}$$

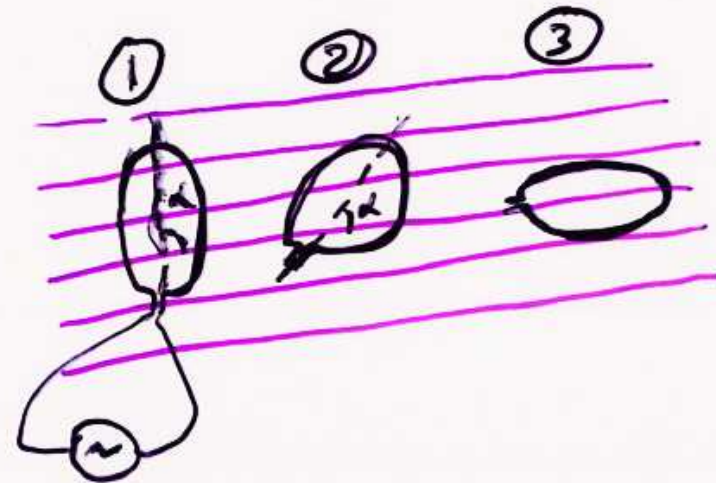
massimo

$$\Phi_M \downarrow \textcircled{2}$$

Intermedio

$$\Phi_M \downarrow \textcircled{3}$$

nullo



# Metodi EM: concetti base – equazioni di Maxwell

## Legge di Faraday-Neumann

• Ricordando la legge di Faraday

$$E = \frac{d\phi_M}{dt}$$

} cioè la f.e.m. indotta in un  
circuito è  $\propto$  alla variazione  
di  $\phi_M$  nel tempo }

• Come si può generare f.e.m.?

### f.e.m. prodotta da c.m. costante o stazionario:

- Movimento di una spira immersa in un c.m. (p.es. il geofono EM)
- Spostamento di un magnete verso una bobina

### f.e.m. prodotta da c.m. variabile

- Flusso di AC in un conduttore produce un c.m. variabile nel tempo (noto come  $H_p$ : campo principale)
- Variazione del flusso magnetico a causa della presenza di corpi conduttivi induce f.e.m. ovvero genera flusso di corrente nel sottosuolo (n. 4 nella figura riportata tra due diapositiva)

Metodi EM: concetti base – equazioni di Maxwell  
FDEM – diffusione/propagazione delle onde EM

$$\nabla^2 \vec{E} - i\mu\omega \vec{E} (\sigma + i\omega\varepsilon) = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - i\mu\omega \vec{H} (\sigma + i\omega\varepsilon) = 0$$

In base alla frequenza ( $\omega$ ) utilizzata una parte prevale l'effetto della (1) Conduzione ( $\sigma$ ) o della (2) propagazione ( $\varepsilon$ )

$$\alpha = \omega \left[ \frac{\mu\varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2}} + 1 \right) \right]^{1/2}$$
$$\beta = \omega \left[ \frac{\mu\varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2}} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

Metodi EM: concetti base – equazioni di Maxwell  
FDEM – diffusione/propagazione delle onde EM

La soluzione di queste equazione è riportata di seguito

$$\alpha = \varpi \left[ \frac{\mu\varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \varpi^2}} + 1 \right) \right]^{1/2}$$

$$\beta = \varpi \left[ \frac{\mu\varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \varpi^2}} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

# Metodi EM: concetti base – soluzione equazioni di Maxwell

In altre parole le proprietà elettriche  $\sigma$  e  $\epsilon$  in funzione della frequenza definiscono la seguente quantità:

$$\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$$

In base al valore di questo rapporto avremo:

$$(1) \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$$

$$(2) \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$$

**Come è facile intuire:**

(1) Materiale dielettrico

(2) Materiale conduttivo

ma occorre capire il ruolo che gioca la frequenza dei segnali utilizzati

## Metodi EM: concetti base – ruolo della frequenza

Si può dedurre che in base alla frequenza impiegata un fenomeno può essere favorito rispetto all'altro e cioè:

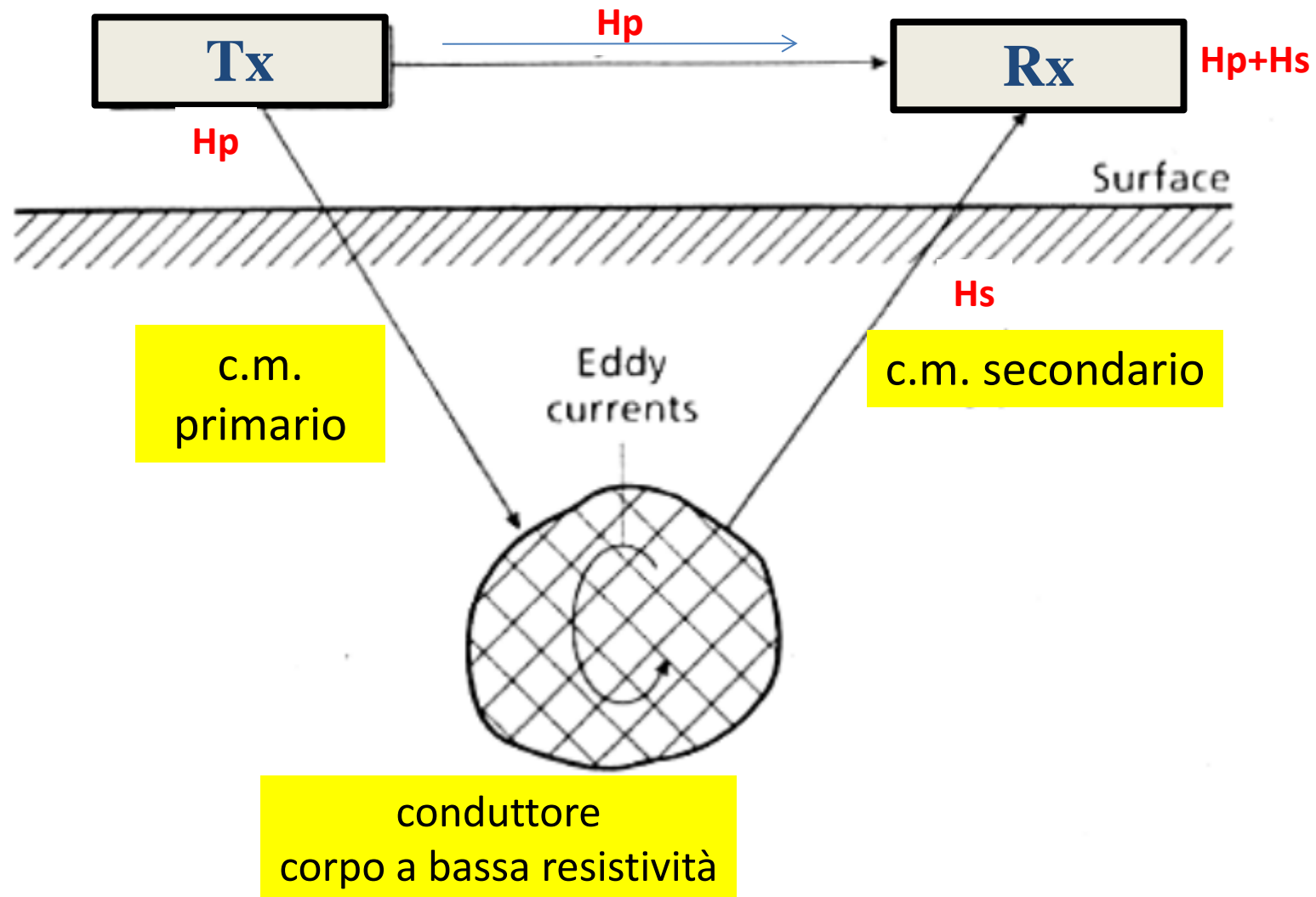
- Conduzione :

$\sigma$ :  $10^{-3} - 1 \text{ (Ohm.m)}^{-1}$  e per frequenze (bassa frequenza  
=> FDEM) *frequenza*  $< 1 \times 10^6 \text{ Hz}$

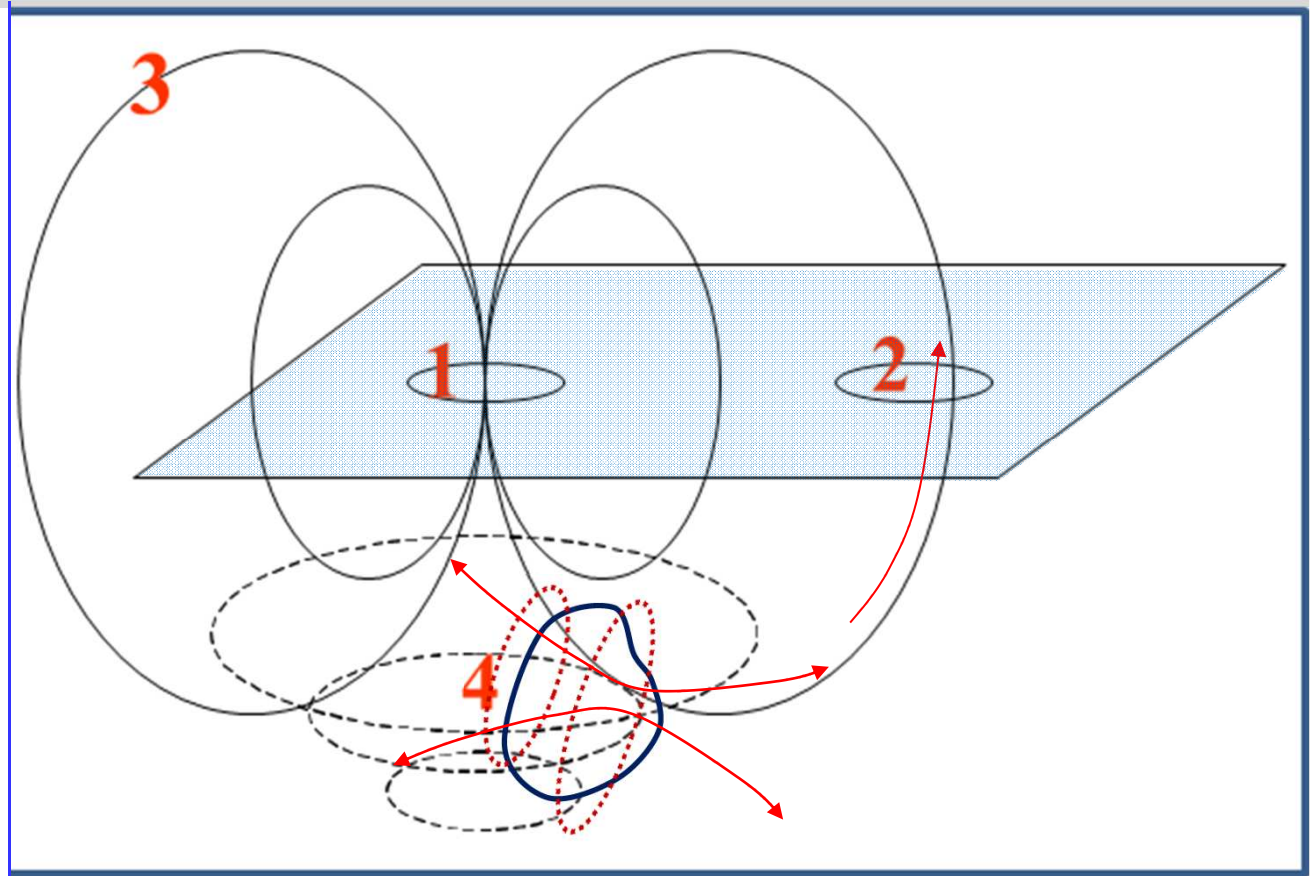
- Propagazione (alta frequenza

==> EM Georadar)  
*frequenza*  $> 1 \times 10^7 \text{ Hz}$

# Metodi EM: concetti base – il metodo FDEM. Frequency Domain Electromagnetic Method. principio base



# Metodi EM: concetti base – il metodo FDEM: Frequency Domain Electromagnetic Method; nel dettaglio:



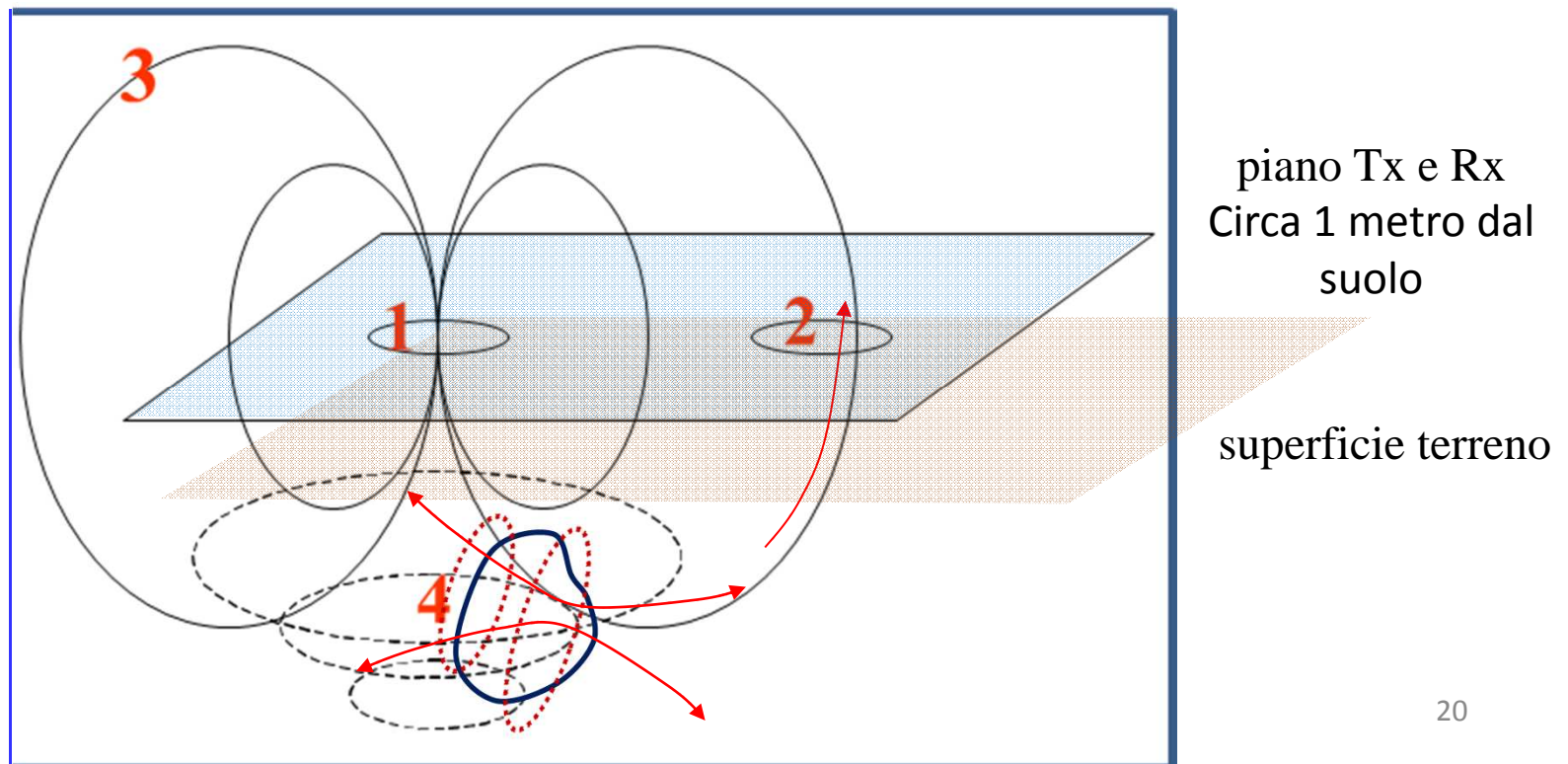
1. Bobina trasmittente
2. Bobina ricevente
3. Linee di forza del campo primario (**H<sub>p</sub>**)
4. Linee di **flusso** delle correnti indotte **in presenza di corpi conduttivi**
5. **I due campi magnetici (**H<sub>p</sub>** e **H<sub>s</sub>**) contribuiscono alla generazione di f.e.m. nella bobina ricevente (2)**

# Metodi EM: concetti base – il metodo FDEM: Frequency Domain Electromagnetic Method.

**Vantaggio 1:** non richiede il contatto fisico con il terreno  
(o il mezzo in generale)

**Vantaggio 2:** permette l'investigazione di aree molto vaste in  
tempi ragionevoli

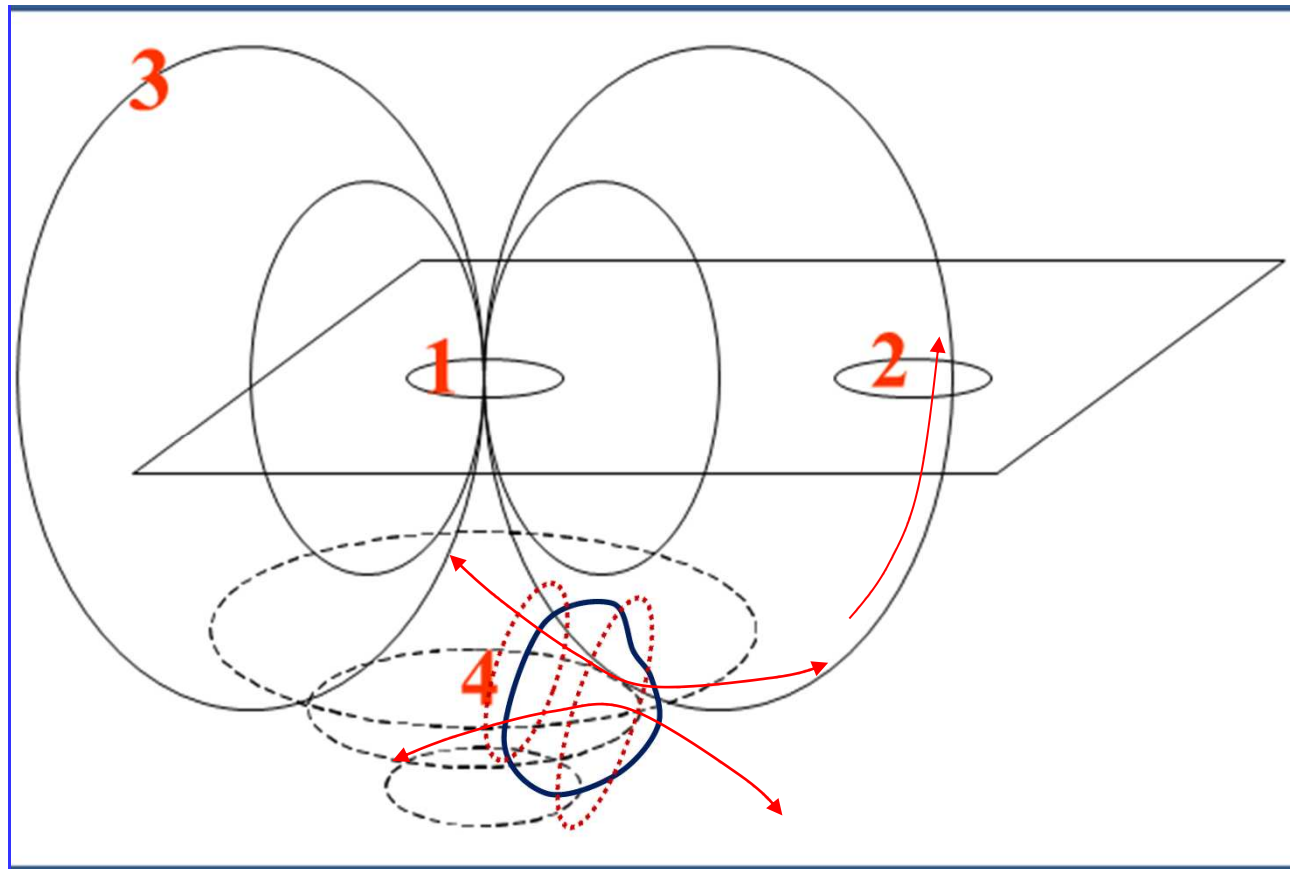
**Vantaggio 3:** si può applicare in aree urbane



# Metodi EM: concetti base – il metodo FDEM: Frequency Domain Electromagnetic Method.

**Svantaggio 1:** efficiente per la ricerca di corpi conduttivi

**Svantaggio 2:** profondità di esplorazione è superficiale  
(superficiale intorno a 10 m) con valore massimo  
di 60 m



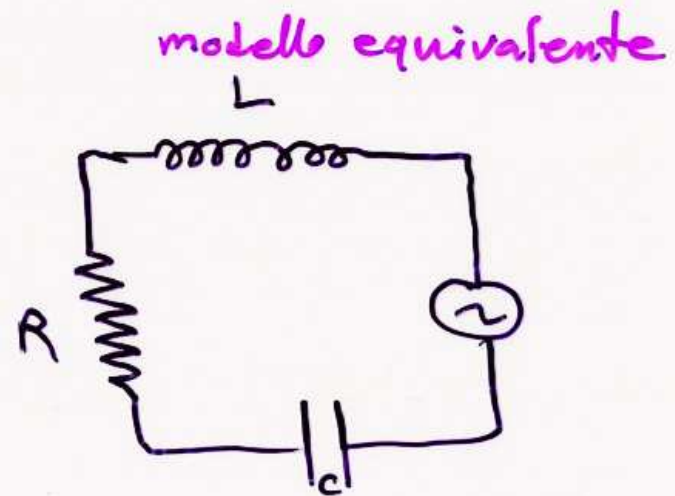
# Metodi EM: concetti base – il metodo FDEM: Frequency Domain Electromagnetic Method.

## Circuito elettrico equivalente

- $H_p - H_s \Rightarrow$  • fornisce informazioni sulla geometria del sottosuolo
  - sulle proprietà elettriche

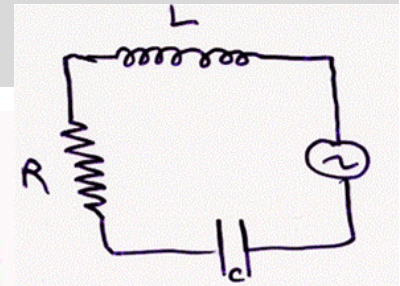
- simulazione della terra (sottosuolo)

- il sottosuolo può essere considerato simile, dal punto di vista del comportamento elettrico, al circuito illustrato nella figura.



# Metodi EM: concetti base – il metodo FDEM: Frequency Domain Electromagnetic Method.

## Circuito equivalente



- è composto da:

- induttanza (L)
- resistenza (R)
- Capacità (C)

- percorso da voltaggio alternato

$$E = E_0 \sin \omega t$$

- induce corrente data da

$$I = \frac{E_0 \sin(\omega t - \alpha)}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

$\alpha$ : fase

parte reale

parte immaginaria

Metodi EM: concetti base – il metodo FDEM: Frequency Domain Electromagnetic Method.  
circuito elettrico equivalente

- induce corrente data da

*c.m. principale*

$$H_p = k \cdot I,$$

*K: dipende dalle caratteristiche della bobina Tx*

$$I = \frac{E_0 \text{Sen}(\omega t - \alpha)}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega c)^2}}$$

parte reale      parte immaginaria

$\alpha$ : fase

- che segue con un certo ritardo (Lag) il voltaggio applicato di un angolo  $\alpha$  dato da

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{\omega L - 1/\omega c}{R} \right]$$

- $\alpha$  è piccola in mezzi resistivi ( $\cong 0^\circ$ )
- $\alpha$  è grande = = conduttivi ( $\cong 90^\circ$ )

si ricordi  
Svantaggio 1:  
Slide n.:22

Metodi EM: concetti base – il metodo FDEM: Frequency Domain Electromagnetic Method.  
Circuito equivalente

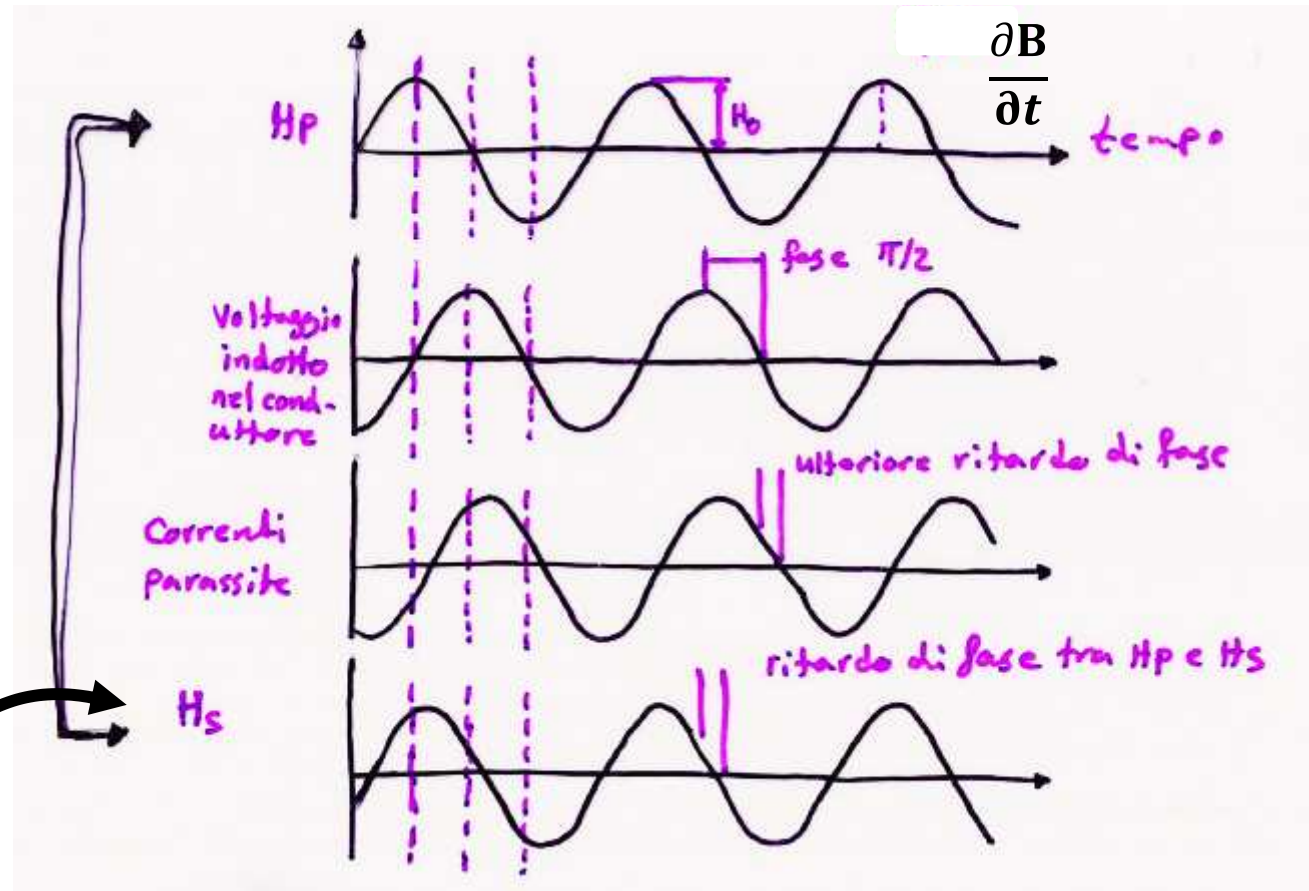
$$\alpha = \frac{1}{R} \left[ \omega L - \frac{1}{\omega C} \right]$$

**$\alpha$ : dipende dalle caratteristiche elettriche del corno conduttivo presente nel sottosuolo.**

Metodi EM: concetti base – il metodo FDEM: Frequency Domain Electromagnetic Method.

C.m. principale e secondario – ritardo di fase complessivo

Segnali sinusoidali  
Tx e Rx  
Notare:  
variazione di:  
(1) Ampiezza  
(2) fase

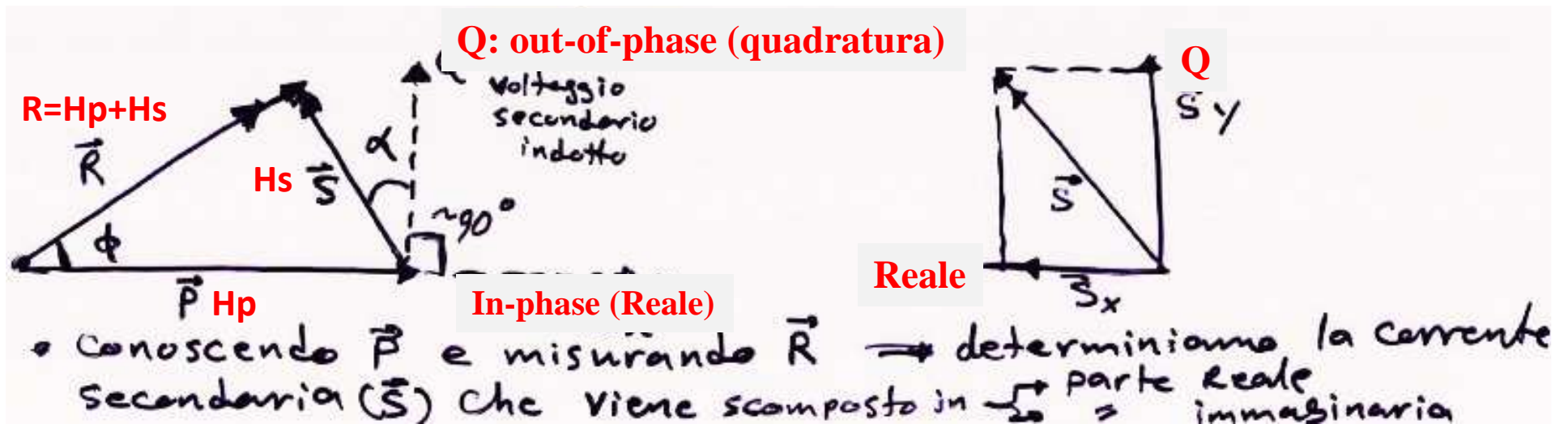


$$H_s = - \frac{k' M_{tc} H_p (Q^2 + iQ)}{kL_c (1 + Q^2)}$$

$$Q = (\omega L_c) / R_c$$

Strumenti **FDEM** portatili noti come '**Slingram**' ==> misurano il **ritardo di fase** tra correnti indotte dai due campi **H<sub>p</sub>** e **H<sub>s</sub>** nella bobina ricevente

$\alpha$ : fase



Conoscendo **H<sub>p</sub>** e misurando **R (H<sub>p</sub>+H<sub>s</sub>)** si può determinare l'intensità vettoriale delle correnti secondarie (**S**),  
**S**: si scompone in due parti Reale (**In-fase**) ed immaginaria (**Q**)

Strumenti **FDEM** portatili noti come '**Slingram**' ==> misurano il **ritardo di fase** tra correnti indotte dai due campi **H<sub>p</sub>** e **H<sub>s</sub>** nella bobina ricevente

## Risultato:

Si **ottengono** valori di **conducibilità elettrica apparente** (**in termini in Q**) in funzione della **profondità** ==> è simile al concetto del SEV della resistività elettrica.

La proprietà fisica risulta essere quella della resistività elettrica o meglio parlare di conduttività elettrica.

• In base alla distanza  $(r)$  tra bobina **Tx e Rx**  
ed il così detto  $k$  (numero d'onda) si può  
ottenere un prodotto  $|k| \cdot r$  ==> **Numero di Induzione**

# K: numero d'onda?

- $K$ : il numero d'onda:
- numero dei cicli compiuti in uno spazio (p.es. **1 metro**).

Il numero d'onda  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

$$k = \frac{2\pi f}{\text{Velocità}}$$

Velocità onde sismiche ed elettromagnetiche

- unità di misura  $(\text{m})^{-1}$
- quando  $f$  è grande  $\lambda$  è piccola ed il numero dei cicli incrementa che per riuscire a registrare correttamente questi cicli occorre stabilire il passo corretto di campionamento da utilizzare nel rilievo.

Strumenti **FDEM** portatili noti come 'Slingram' ==> misurano il **ritardo di fase** tra correnti indotte dai due campi **H<sub>p</sub>** e **H<sub>s</sub>** nella bobina ricevente

- In base alla distanza ( $r$ ) tra bobina **Tx e Rx** ed il così detto  $k$  (numero d'onda) si può ottenere un prodotto  $|k| \cdot r \Rightarrow$  **Numero di Induzione**

• se  $|k| \cdot r \ll 1$ , si parla di metodi EM a basso numero di induzione

**Low Induction Number (LIN)**

• se  $|k| \cdot r \gg 1$ , si parla di onda piana in quanto

$r \gg \lambda$   
a questa famiglia fanno parte le seguenti tecniche EM:

- a) metodi Magnetotellurici
- b) = Tellurici
- c) metodo **VLF** (very low frequency)

Strumenti **FDEM** portatili noti come '**Slingram**' ==→ misurano il **ritardo di fase** tra correnti indotte dai due campi **H<sub>p</sub>** e **H<sub>s</sub>** nella bobina ricevente

altri tipi di strumenti FDEM – Geonics, Toronto, Canada



EM38



EM31



EM34-3

Strumento	Frequenza	Distanza tra le spire
EM38	13200 Hz	1 m
EM31	9800 Hz	3.7 m
EM34-3	6400,1600,400	7.5,15,30 m

Strumenti **FDEM** portatili noti come '**Slingram**' ==→  
misurano il **ritardo di fase** tra correnti indotte dai due  
campi **H<sub>p</sub>** e **H<sub>s</sub>** nella bobina ricevente

Strumenti parametrici o multifrequenza

Profiler EMP-400; 1-16 KHz; distanza spire: 1.25m, GSSI, USA



Misurano la conduttività dei terreni  
(1/resistività)  
Misurano l'intensità magnetica  
indotta

Strumenti parametrici o multifrequenza

GEM-2: 0.3 – 40 KHz,  
USA

Strumenti **FDEM** portatili noti come '**Slingram**' ==→  
misurano il **ritardo di fase** tra correnti indotte dai due  
campi **H<sub>p</sub>** e **H<sub>s</sub>** nella bobina ricevente

Strumenti parametrico/Geometrico

Dualem (Canada). **Ottima strumentazione**

9 KHz (frequenza simile a quella della strumentazione EM31)

Distanze tra le spire: 1, 2, 3, 6, ???

Quindi: profondità di esplorazione diverse per ciascuna lunghezza del sistema



strumentazione  
FDEM: Dualem



# FDEM:

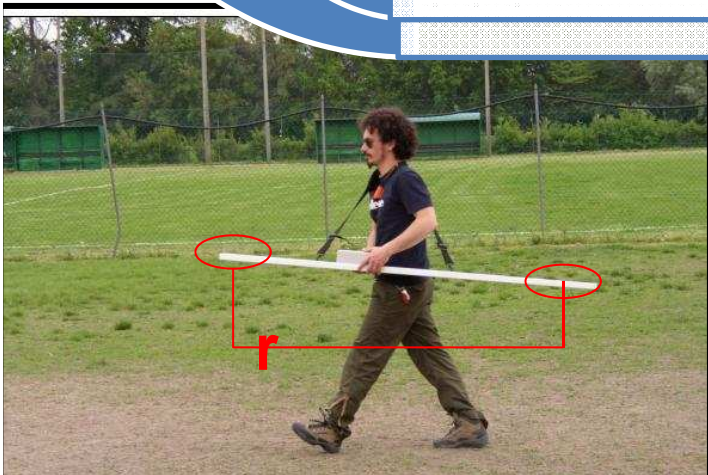
La profondità d'indagine a confronto con la tecnica geoelettrica galvanica ERT

ERT/PI: è all'incirca  $1/5-1/6$  della massima apertura del quadripolo di misura

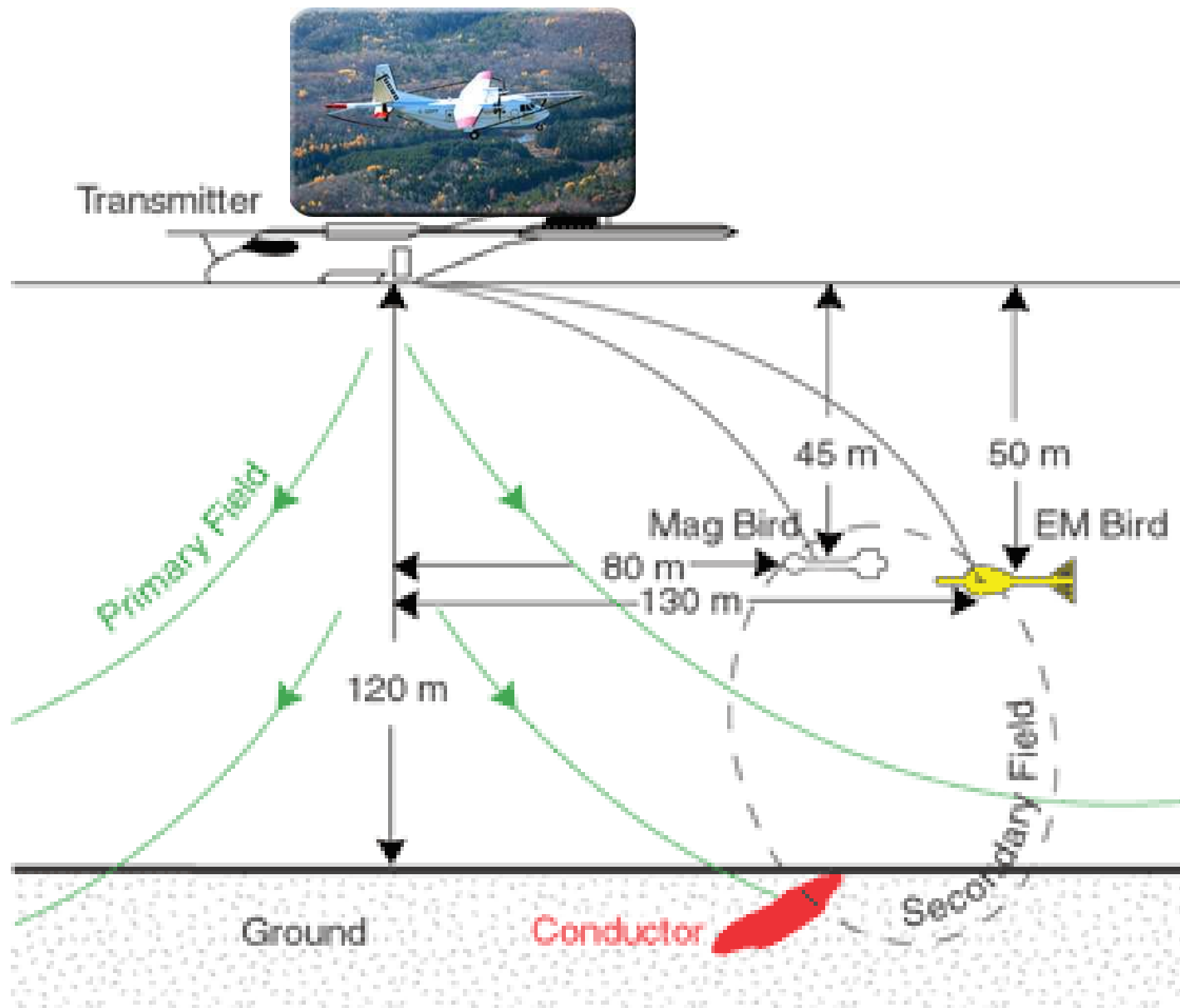
(di solito lunghezza profilo in metri)

**100 metri  $\approx$  18/20m**

**FDEM:** è funzione decrescente della frequenza e crescente della distanza tra le due bobine, **r**, e può essere maggiore di questa



# Strumenti **FDEM** portatili da aereo (**Airborne EM**) + magnetometro (Mag Bird) - schema generale



Strumenti **FDEM** portatili noti come '**Slingram**' ==> misurano il **ritardo di fase** tra correnti indotte dai due campi **H<sub>p</sub>** e **H<sub>s</sub>** nella bobina ricevente

Abbiamo:

- (1) distanza variabile tra le spire Tx-Rx permette di investigare profondità differenti ==> sondaggio elettrico **geometrico**, Dualem, EM38, **EM34-3**
- (2) Anche frequenze diverse permettono di esplorare profondità diverse ==> sondaggio elettrico **parametrico**, **Gem-2**, **Profiler 400**, **Gem-2**)

## Risultato:

Si ottengono valori di conducibilità elettrica apparente in funzione della profondità ==> è simile al **concetto del SEV** della resistività elettrica **con l'ovvio vantaggio di non dover avere contatto diretto co il terreno.**

# Metodi FDEM tipo 'Slingram' ==> LIN (Low Induction Number)

## LIN

Il concetto fisico che sta alla base di questi strumenti ci suggerisce che se:

la distanza tra le spire dello strumento, è grande rispetto al loro diametro (almeno un fattore 5),

allora la **conducibilità elettrica**  $\sigma$  di un semispazio conduttore omogeneo ed isotropo è data da:

$$\sigma = \text{Im} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) \frac{4}{\mu \omega r^2}$$

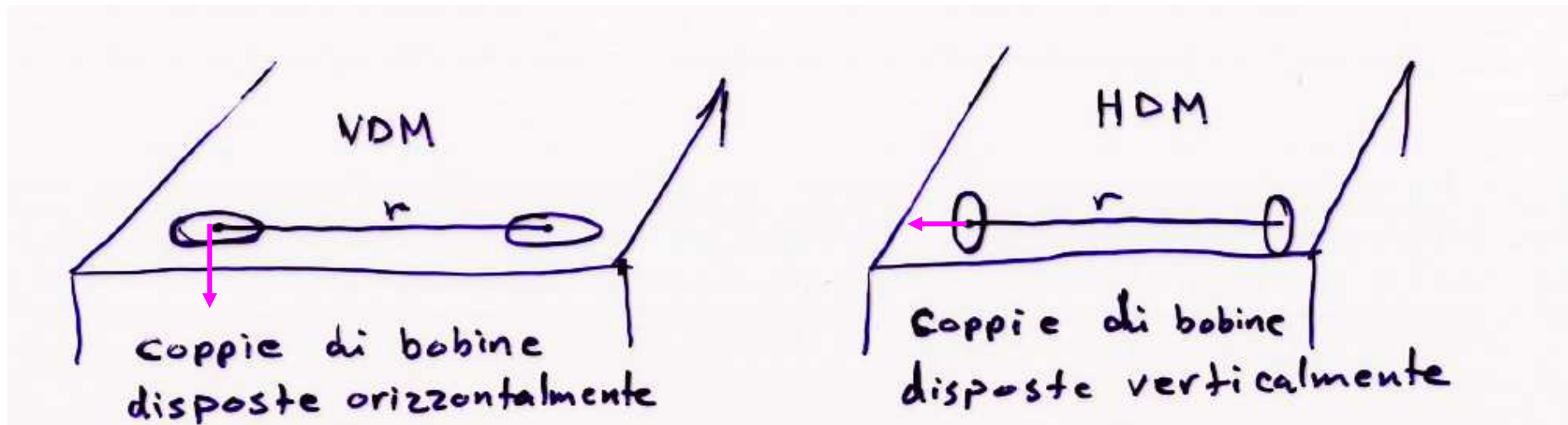
S/m  
o  
mS/m

# Metodi FDEM tipo 'Slingram' ==>

## Orientazione spire

### VDM e HDM

- VDM: Vertical Dipole Mode: le spire sono in configurazioni orizzontale perciò le linee di forza sono verticali,
- **HDM: Horizontal Dipole Mode: le spire sono in configurazione verticale perciò le linee di forza sono pressoché orizzontali.**



Metodi **FDEM** tipo '**Slingram**' ==>

Profondità di esplorazione vs profondità pelle ( $\delta$ )

## VDM e HDM

- In mezzi resistivi l'onda EM si propaga indefinitamente
- In mezzi **conduttivi le onde EM** subiscono **attenuazione** (in ampiezza) e si parla di **diffusione del campo** (in GPR: si parla di propagazione del campo),
- Normalmente la profondità di esplorazione è  $< \lambda/2$
- profondità pelle ( $\delta$ ) è espressa da:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \cong 503 \cdot \frac{1}{\sqrt{f\sigma}} \quad (m)$$

- In pratica la profondità al quale è possibile avere correnti indotte secondarie è intorno a  $(0.2 \cdot \delta)$

$$100 \cdot \frac{1}{\sqrt{f\sigma}} \quad (m)$$

## Metodi FDEM tipo 'Slingram' ==>

Esempio applicativo: Profondità di esplorazione vs profondità pelle ( $\delta$ )

Strumento	Frequenza	Distanza tra le spire
EM31	9800 Hz	3.7 m

- $\delta = 30$  metri (condizioni normali di terreno)
  - Distanza tra le spire 3.7 m
  - $LIN = 3.7/30 = 0.12$  cioè  $\ll 1$
  - Profondità esplorazione  $\delta/5 = 30/5 = 6$  metri
- **Questo significa che l'EM31 misura un valore unico di conduttività elettrica medio di un strato di spessore pari all'incirca 6 metri,**
  - **Ottimo per rilevare contatti laterali (risoluzione laterale pari alla distanza  $r$  tra le spire,**
  - Pessimo per rilevare corpi posti a diverse profondità sullo stesso punto verticale

Metodi **FDEM** tipo 'Slingram' ==>

Profondità di esplorazione in funzione della configurazione utilizzata (VDM o HDM o tutti due)

**Modello:**

strato sottile a diversa  
profondità 'normalizzata' e  $\sigma$   
omogena.

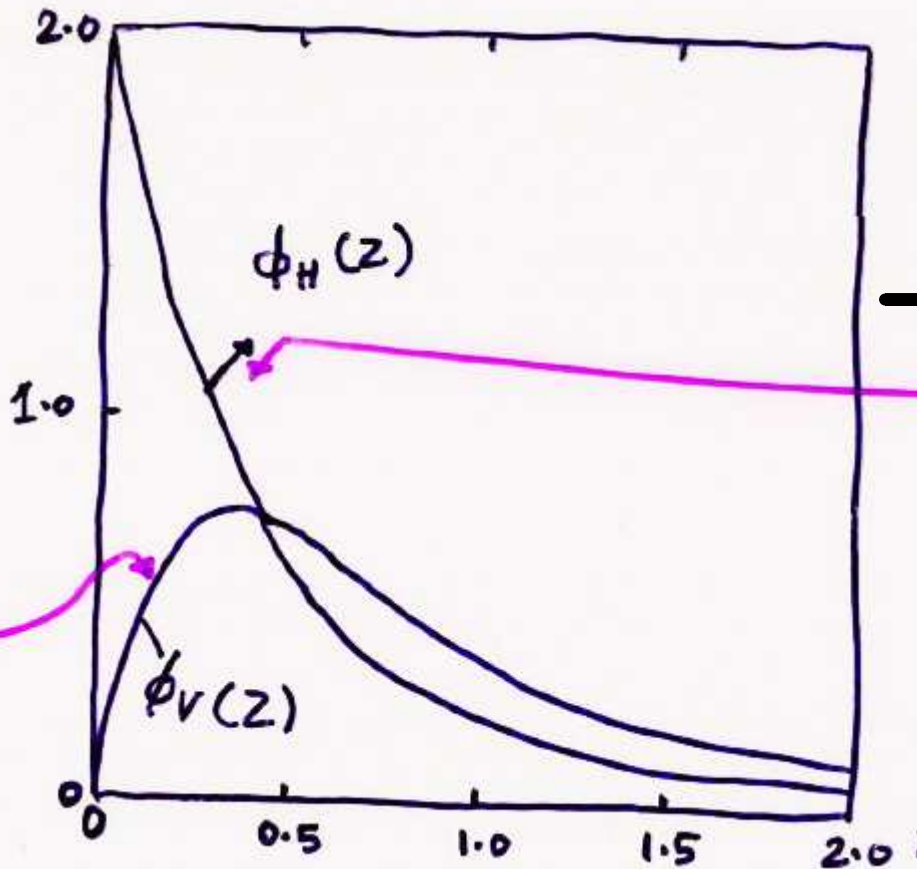
Z1/r

Z2/r

Z3/r

I risultati in termini di  
sensibilità della misura sono  
riassunti nella figura  
per le due modalità di  
posizionamento del dipolo  
magnetico (VDM-HDM)

Sensibilità della risposta



z/r: distanza tra spire Tx e Rxi

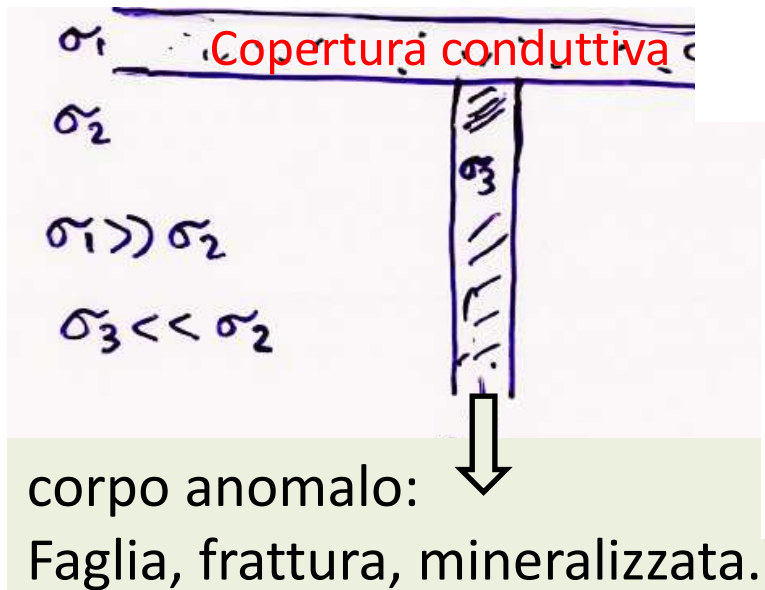
# Metodi FDEM tipo 'Slingram' ==>

Profondità di esplorazione in funzione della configurazione utilizzata

Esempio: risposta EM in termini di conduttività elettrica

faglia/frattura (conduttiva) in un mezzo roccioso (resistivo) sovrapposto da sedimenti conduttivi

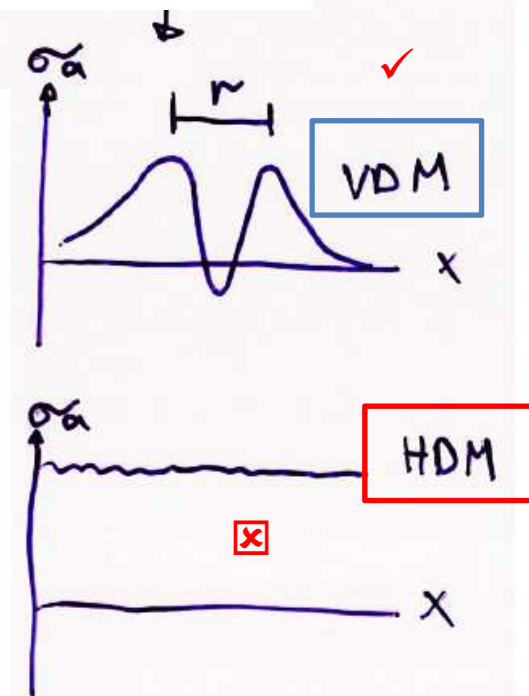
## schema di modello elettrico



**HDM: sente solo la copertura conduttiva**

**VDM: raggiunge profondità superiore quindi sente la presenza del corpo conduttivo (frattura)**

## risposta teorica



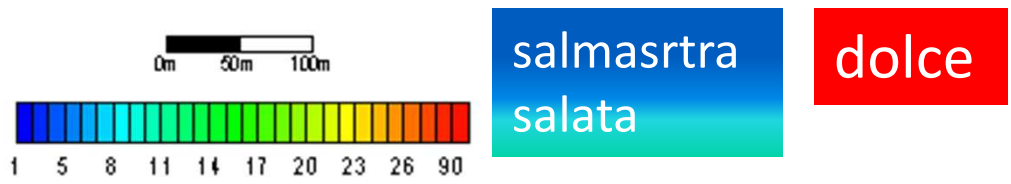
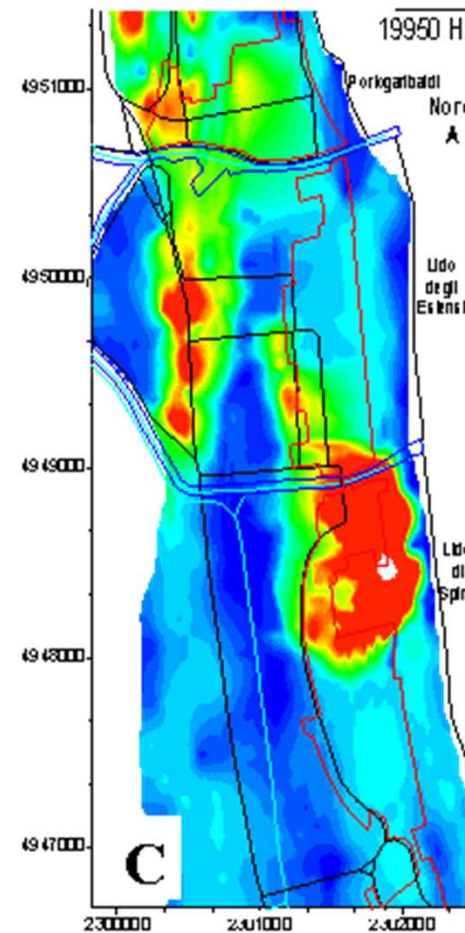
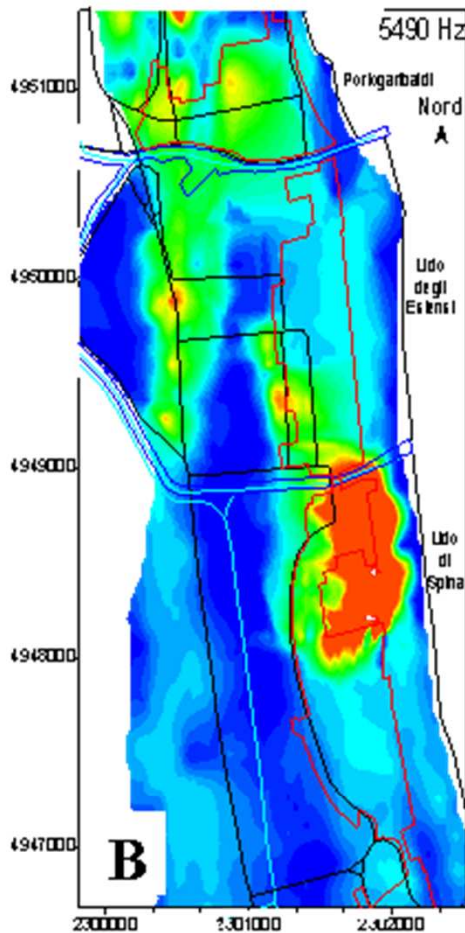
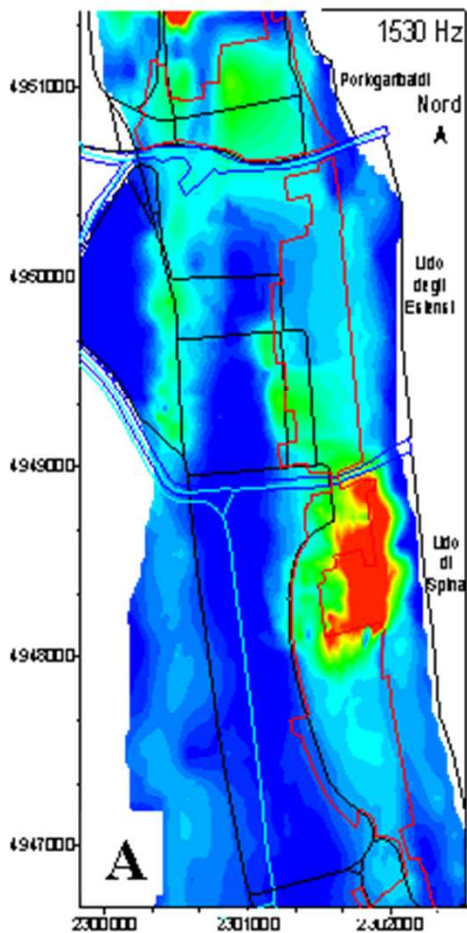
**esempio applicativo**

Modello idrogeologico concettuale - Il Monitoraggio di acquiferi costieri

6 – 8 m

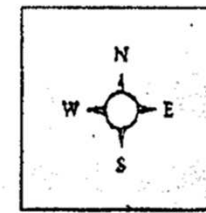
4 – 6 m

circa 2 m



Mappe di resistività apparente/FDEM

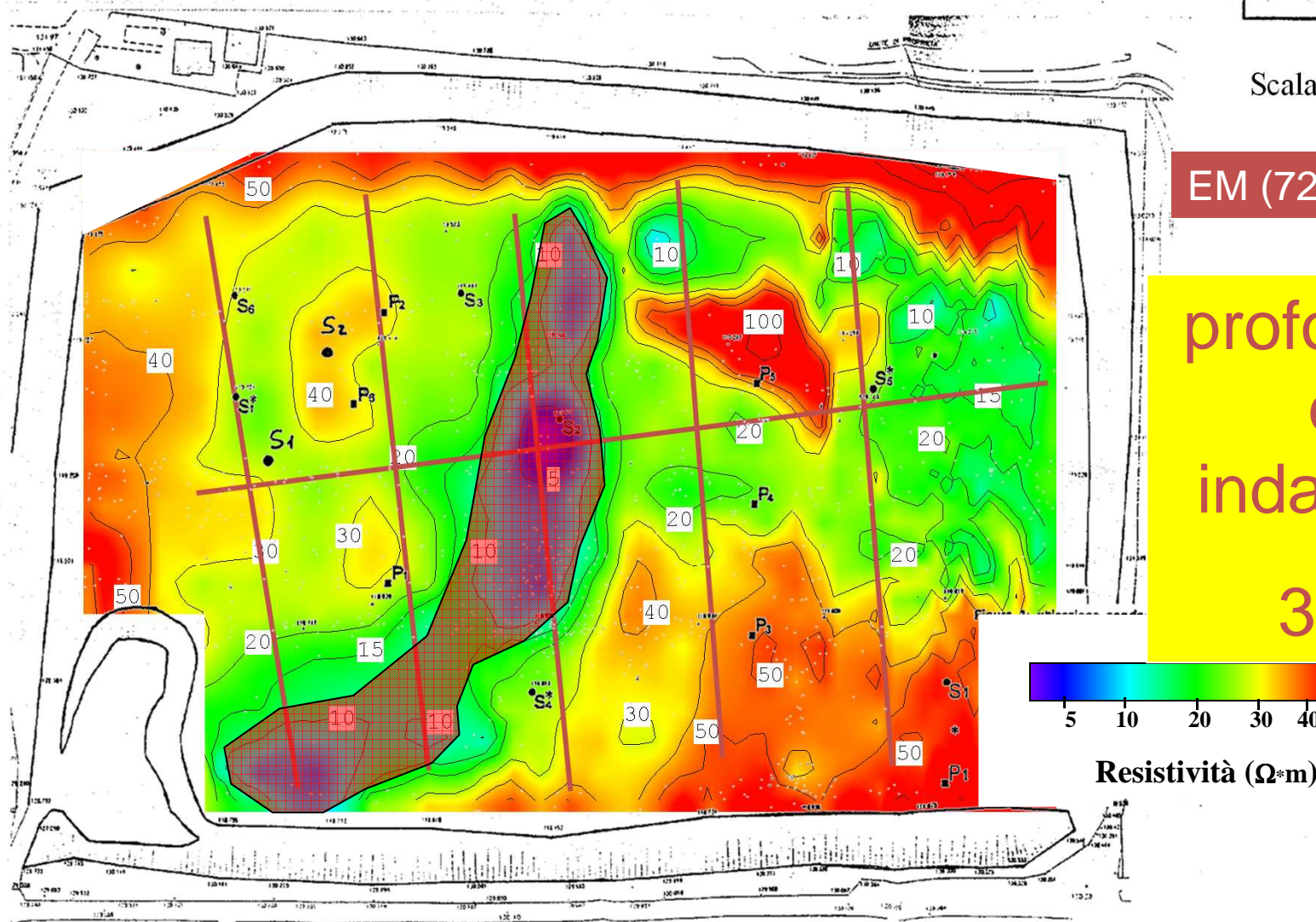
# FDEM: esempio: Caratterizzazione di un'area di ex-cava con resti metallici (BS) frequenza: 7275 Hz



Scala 1 : 2000

EM (7275 Hz)

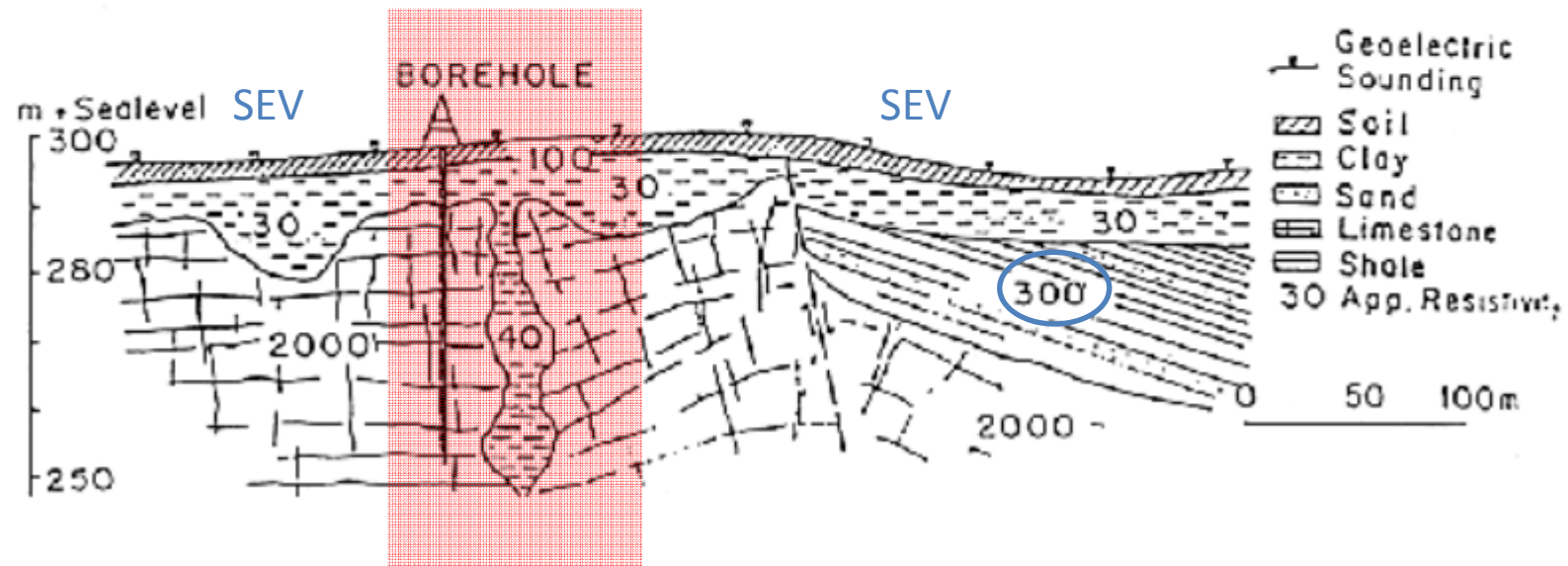
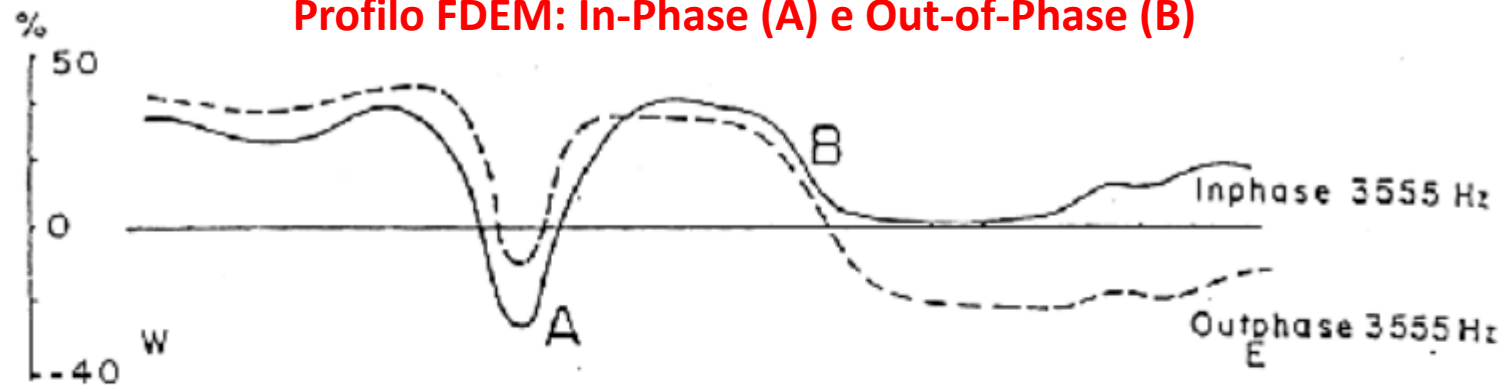
profondità  
di  
indagine:  
3 m



# FDEM: portatili noti come 'Slingram'

**Esempio:** applicazione geologica

**Profilo FDEM: In-Phase (A) e Out-of-Phase (B)**



**Anomalia: A e B**

# Tecnica VLF EM a bassa frequenza