

Report sull'esperienza di registrazione di eventi sismici con magnitudo inferiore ad 1.0 utilizzando il recorder SL06 e sensori SS45

di C.Fidani, M.Mariotti ed A.Prosperi

28 dicembre 2015

SARA electronic instrument s.r.l. - www.sara.pg.it - info@sara.pg.it

© Tutti i diritti sono riservati, All right reserved;
la riproduzione è concessa purché senza fini di lucro

Introduzione

L'uso di sensori economici, geofoni, a frequenza relativamente alta è di solito messa in discussione per la loro intrinseca limitazione a riprodurre basse frequenze e relativamente scarsa sensibilità. Questo report descrive un esempio di utilizzo del sensore SS45 unito al registratore SL06 dove si mettono in evidenza le loro capacità di rilevamento. I dati acquisiti mostrano come, in sistemi opportunamente progettati allo scopo, si possano raggiungere performance di rilevamento di segnali deboli in un'ampia gamma di frequenze. Tale capacità trova applicazione sia nel monitoraggio sismico permanente che nel monitoraggio di siti dove sia attesa una microsismicità di bassissima intensità indotta da attività industriali quali iniezione di gas o fluidi, sfruttamento geotermico od altra attività industriale. Il report pone in evidenza i limiti del rilevamento di segnali deboli non solo relativi alla capacità dello strumento ma anche del sito.

Il caso sotto indagine

Riportiamo un esempio di parametrizzazione di un insieme di piccoli eventi appartenenti allo sciame sismico localizzato fra Città di Castello e Pietralunga, Umbria, e iniziato il 21/12/2015. Alla data di stesura dell'articolo lo sciame è ancora in corso. Gli eventi presi in esame sono 33, con ipocentri di profondità inferiori a 10km e con magnitudo inferiore a 1.3. Di questi solo 8, i più intensi, sono stati localizzati dalla rete nazionale.

La stazione sismica si trova a una distanza media dagli epicentri dello sciame pari a circa 2.5 km. Sita in località Baucca di Città di Castello (PG) è ospitata sul pavimento al piano terra di un'abitazione in pietra. Da misure precedenti il sito mostra rapporti spettrali prossimi a 1 per tutto il range di frequenze fra 0.1Hz e 20Hz riscontrando la morfologia verificata a vista di roccia affiorante. Il dispositivo è un registratore SL06 dotato di sensori a basso costo SS45 con frequenza propria 4.5Hz e sensibilità 80V/m/s. Il sistema si è dimostrato di eccezionale risoluzione.

Localizzazione

Gli eventi dello sciame sono stati rilevati a singola stazione e sono risultati di piccolissima intensità. Delle 33 localizzazioni, una ha magnitudo superiore ad 1, 21 hanno magnitudo compresa fra 0 ed 1 mentre ben 11 di questi eventi possiedono magnitudo negativa. Le localizzazioni sono state

eseguite attraverso il programma SEISMODESK di SEISMOWIN (scaricabile dal ns sito www.sara.pg.it sezione software). Il software consente di risalire alla direzione di provenienza del raggio sismico partendo dagli angoli di emersione e back-azimut, uniti alla valutazione della distanza in un modello crostale stratificato. L'ipocentro stato è ricavato utilizzando la Legge di Snell ed eseguendo un ray-tracing sul modello crostale.

Gli eventi di piccola magnitudo possono essere localizzati con precisione quando abbiamo condizioni di rumore di fondo accettabili e, disponendo di una sola stazione, con una robusta valutazione degli angoli di provenienza. Errori nelle localizzazioni possono essere introdotti anche da una valutazione errata delle velocità e degli spessori attraversati dai raggi sismici. Tuttavia, nel processo di parametrizzazione degli eventi il modello di stratificazione, pur contribuendo all'errore nella localizzazione, non ha posto un limite significativo alla minima magnitudo rilevabile. Invece, il livello del rumore di fondo ha costituito un limite invalicabile per la determinazione di questo parametro. Nei giorni 21 e 22 del mese di dicembre 2015 il rumore di sito della stazione di Baucca ha raggiunto un livello particolarmente basso, con valori di picco nella velocità inferiori a 50nm/s. D'altra parte, il rumore introdotto dallo strumento risultava notevolmente più basso del rumore di sito, (inferiore al nanometro/secondo) contribuendo solo per qualche punto percentuale all'errore totale. Gli eventi più

piccoli considerati in questo sciame hanno ampiezze in velocità almeno 10 volte maggiori di quella del rumore di fondo totale.

La distanza media degli ipocentri dello sciame dalla stazione è stata stimata intorno ai 5.1km mentre l'azimuth medio e l'incidenza media del raggio sismico degli eventi sono risultati rispettivamente pari a 43.4° e 146.5°. Essendo le dispersioni nella distanza, azimuth e incidenza rispettivamente pari a 1km, 23.7° e 13.8°, la nuvola degli eventi ha avuto un diametro di dispersione di circa 1 km. Per quanto riguarda la profondità media degli eventi, questa si è collocata intorno ai 4.5km, contro una media di 8.2km di profondità calcolata dalla rete sismica nazionale su 8 eventi. Le deviazioni standard sulle profondità sono pari a 1.1 km e 1.8 km rispettivamente per gli eventi calcolati dalla stazione di Baucca e dalla rete nazionale.

Lista degli eventi

Gli eventi sismici rilevati fra il 21 e il 22 dicembre 2015 sono riportati nella tabella seguente. Nella lista non sono stati inclusi gli eventi localizzati nella stessa area ma con distanze superiori ai 10km dalla stazione. Si noti come sono presenti anche eventi di magnitudo negativa. Come già evidenziato questo dettaglio riveste particolare importanza nell'opportunità di utilizzare il sistema SL06+SS45 per la valutazione della microsismicità.

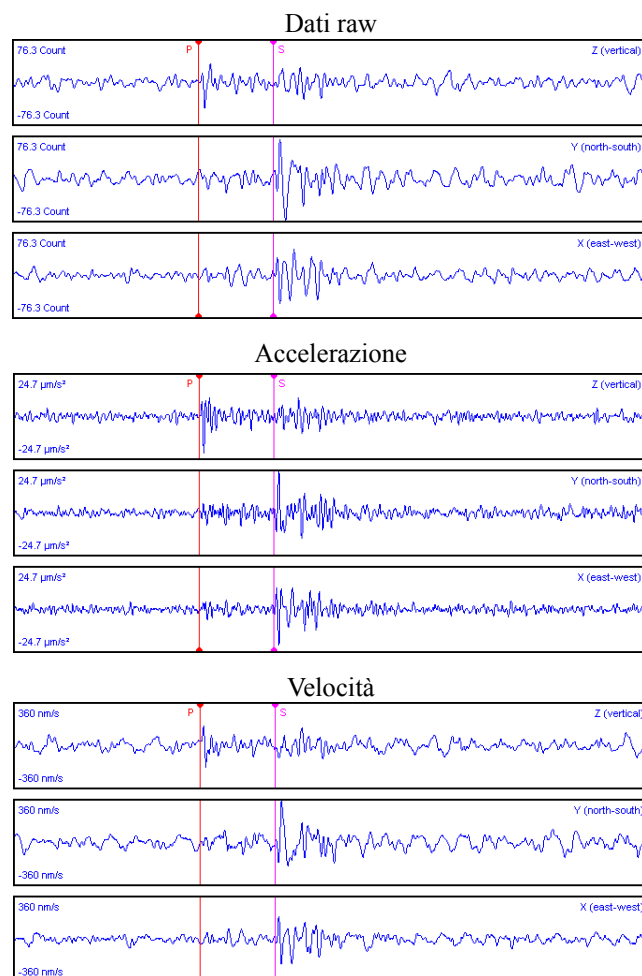
Tempo onda P	ML	Localizz. Lat/Lon	Prof. [km]
21/12/15 02:57:24	-0.54	43.4579 12.3218	4.53
21/12/15 02:57:29	-0.30	43.4722 12.3250	4.48
21/12/15 02:57:36	0.77	43.4731 12.3228	4.62
21/12/15 02:57:42	0.04	43.4665 12.3135	4.44
21/12/15 02:58:11	-0.62	43.4595 12.3145	4.99
21/12/15 03:33:10	0.16	43.4731 12.3259	3.94
21/12/15 04:00:02	0.24	43.4714 12.3257	4.46
21/12/15 05:49:41	0.07	43.4656 12.3289	4.65
21/12/15 05:59:07	1.29	43.4731 12.3256	4.41
21/12/15 06:35:51	0.64	43.4708 12.3230	4.02
21/12/15 09:25:35	0.39	43.5072 12.2888	3.14
21/12/15 09:43:29	-0.16	43.4851 12.3335	9.89
21/12/15 09:43:41	0.21	43.4673 12.3312	4.31
21/12/15 11:51:55	0.22	43.4709 12.3267	4.62
21/12/15 16:06:33	0.24	43.4716 12.3305	4.17
21/12/15 17:33:00	0.82	43.4713 12.3282	4.33
21/12/15 17:42:06	0.70	43.4752 12.3304	3.92
21/12/15 17:42:18	0.54	43.4701 12.3238	4.50
21/12/15 17:42:25	-0.04	43.4563 12.3049	4.88
21/12/15 17:46:21	0.49	43.4693 12.3274	4.38
21/12/15 17:46:32	-0.28	43.4676 12.3291	4.31
21/12/15 17:47:03	-0.54	43.4684 12.3292	4.82

21/12/15 17:48:07	0.44	43.4750 12.3255	4.24
21/12/15 18:12:46	0.28	43.4731 12.3296	4.30
21/12/15 20:41:09	0.70	43.4718 12.3292	4.53
21/12/15 20:41:23	-0.52	43.4573 12.3189	4.87
21/12/15 21:05:47	0.54	43.4682 12.3263	4.34
21/12/15 21:06:13	-0.50	43.4677 12.3253	4.69
21/12/15 21:06:16	-0.51	43.4604 12.3385	4.16
21/12/15 21:06:19	-0.72	43.4380 12.3504	1.86
21/12/15 23:53:11	0.71	43.4718 12.3279	4.40
22/12/15 00:08:17	0.28	43.4717 12.3271	4.30
22/12/15 03:25:59	0.62	43.4776 12.3311	5.48

Tabella 1 - Lista eventi

Un sismogramma

Nella figura che segue sono state riportate le tre componenti di un sismogramma, quello relativo all'evento di magnitudo -0.54 con tempo di origine 17:47:03 del 21 dicembre 2015. Qui, il 22-esimo evento listato nella tabella 1 è stato rappresentato in quattro diversi formati. La differenza S-P del piccolo terremoto è risultata di 0.89s, la distanza pari a 2.41km, la profondità pari a 4.82km, l'azimut di 50.2° e l'emersione di 75.4° corrispondente a un angolo di incidenza di 149.7°.



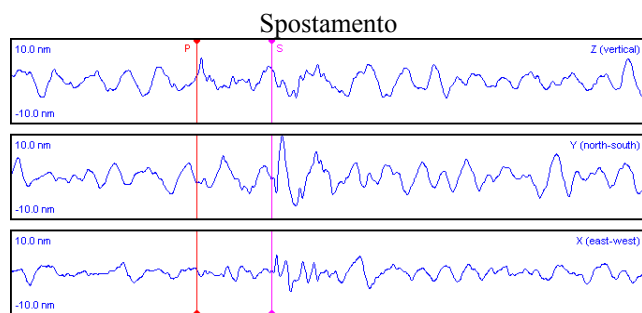


Figura 1 – dati raw, accelerazione, velocità e spostamento del 22-esimo evento della lista ML:-0.54

Dall'osservazione diretta dei sismogrammi le fasi risultano molto evidenti già nei dati raw (velocimetro), sia in accelerazione che in velocità. In spostamento il picco massimo, presente subito dopo l'onda S nel canale Y (Nord-Sud), emerge dal rumore di fondo di pochi nanometri. Ciò indica che siamo, in questo caso, al limite risolutivo possibile per questo rumore di fondo totale. Resta da differenziare quanto il rumore sia attribuibile al sito e quanto allo strumento; tale valutazione è rimandata ad articolo

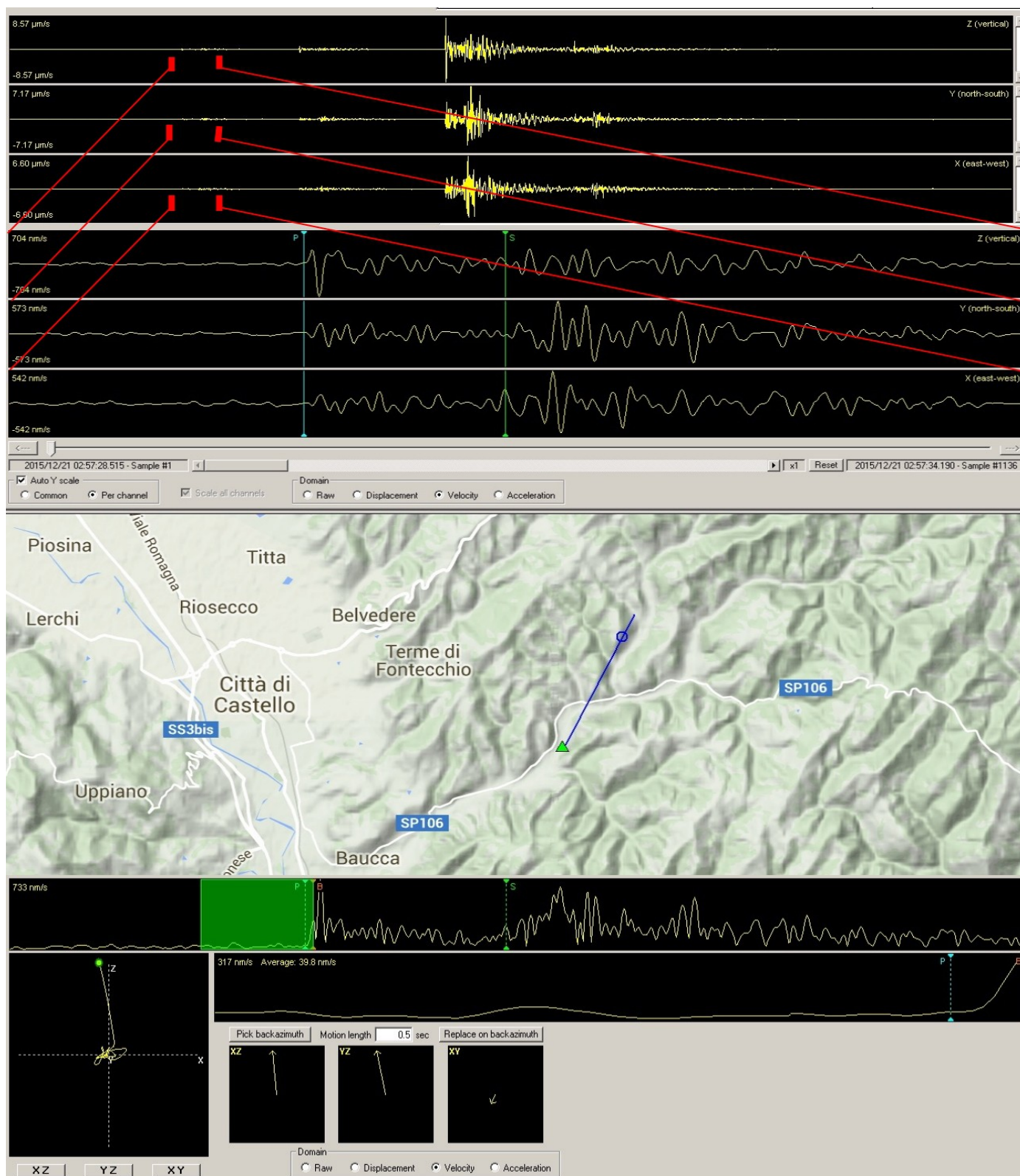


Figura 2 - Metodo di back-azimuth e angolo di emersione

futuro. Il rumore di fondo registrato nello stesso sito in momenti diversi risulta inferiore a quello dell'esempio. Ciò lascia ragionevolmente supporre che, almeno in questo caso, sia predominante il rumore *di sito* e non quello strumentale.

Le considerazioni sul rumore nello spostamento risultano particolarmente importanti nel calcolo della magnitudo lineare che dipende direttamente dalle ampiezze misurate in spostamento. Infatti la magnitudo lineare è definita come

$$M = \log(A) + a \log(r) + b r + c,$$

dove A è l'ampiezza massima in spostamento, r è la distanza dell'evento e a , b e c tre costanti. Dall'esempio della Figura 1 era evidente un errore del 50% nella lettura dello spostamento massimo, ciò si riflette in un errore pari a circa 0.5 nella magnitudo. Ciò significa che la magnitudo dell'evento di Figura 1 è compreso fra -1 e 0 nei limiti di errore.

Metodo back-azimuth e angolo di emersione

Il metodo utilizzato per localizzare questi eventi (con singola stazione) è quello che calcola sia il back-azimuth per conoscere la direzione della sorgente rispetto alla stazione di rilevamento che l'angolo di emersione rispetto alla superficie. Attraverso questi angoli iniziali, opportunamente valutati con picking manuale e corretti per la presenza di una superficie libera in corrispondenza della posizione del sismografo, viene calcolato a ritroso il percorso del raggio sismico fino all'ipocentro.

La Figura 2 illustra, seppure parzialmente, la sequenza di operazioni necessarie al calcolo. Nell'ordine si evidenzia: il caricamento del segnale, il picking P-S, il diagramma del vettore assoluto, il picking del back-azimuth e la rappresentazione su una mappa. Nella figura sotto la mappa si evidenzia il picking del back-azimuth ottenuto osservando sia il diagramma del vettore assoluto di velocità che il movimento della particella 3D e i 3 angoli di direzione della stessa. Una volta ottenuto il picking si ottiene la direzione (visualizzata in mappa dal raggio blu) e l'epicentro del terremoto individuato dal cerchietto blu lungo la direttrice di provenienza dell'onda sismica.

La Figura 2, benché sembri mostrare solo un sismogramma in realtà ne contiene 5, dei quali il ritaglio sottostante mostra il primo. Questo è anche il primo gruppo di sismogrammi, relativo ai cinque eventi registrati fra le 2:57 e le 2:58 del 21/12/2015. I cinque eventi rappresentano l'inizio dello sciame e si sono susseguiti con alcuni secondi di differenza gli uni dagli altri. Il quarto evento risulta sovrapposto alla

coda del terzo che è l'evento di magnitudo maggiore. La sovrapposizione del terzo e quarto evento di magnitudo differente e l'esiguità delle ampiezze degli altri tre non hanno impedito di determinare con certezza gli arrivi di tutte le onde P e S. Il ritaglio delle tre componenti del primo evento della Tabella 1 ($M = -0.54$) è evidenziato in rosso e riportato nella parte intermedia della figura insieme al picking delle onde P e S.

Dagli esperimenti eseguiti risulta inoltre importante, per un back-azimuth accurato, disporre di un dataset campionato ad almeno 200 campioni al secondo. Questo non per la necessità di avere una larghezza di banda, anzi questa risulta essere più che sufficiente nel range 2-20Hz, ma piuttosto per definire meglio il movimento della particella in 3D. La possibilità di campionare a frequenze più elevate del solito (≥ 200 Hz), benché desiderabile, potrebbe essere sostituita da una selezione degli angoli ottenuta interpolando il segnale fra campioni adiacenti.

Cluster di eventi

Ripetendo lo stesso procedimento su tutti gli eventi dello sciame, una distribuzione spaziale degli eventi riportati nella Tabella 1 può essere rappresentata nella figura che segue come una nuvola del diametro di circa 1km. Gli assi graduati orizzontali della figura corrispondono alle direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest, che intersecano l'asse Z a una profondità di 0 km.

L'interessante per la distribuzione degli stessi risiede nella possibilità di individuare posizione, dimensioni e geometria delle sorgenti sismogenetiche. La valutazione della distribuzione è però rimandata a futuri approfondimenti anche dopo aver rivalutato il modello crostale utilizzato (modello standard INGV per l'appennino dell'Italia centrale), come da nota a fine testo.

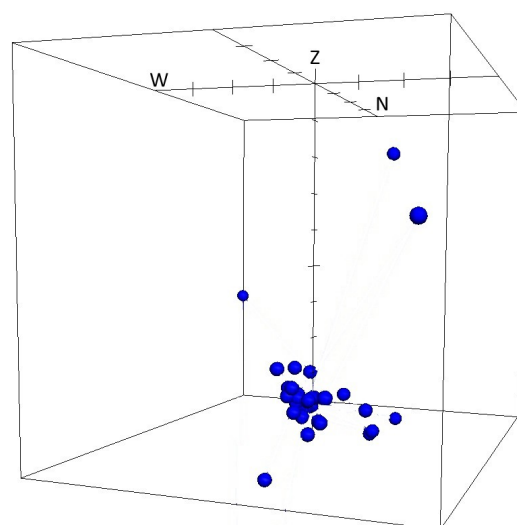


Figura 3 - Distribuzione spaziale degli eventi listati

Conclusioni

Il rilevamento di micro eventi sismici a corto raggio richiede dallo strumento una elevata capacità risolvibile. In queste condizioni la sensibilità assoluta dello strumento non sembra essere fondamentale, piuttosto a risultare cruciale è il rapporto segnale/rumore di sito. A tale scopo, l'istallazione di sensori in foro anche a profondità modeste per limitare il rumore superficiale antropico o per il raggiungimento della quota del substrato roccioso, può rappresentare una soluzione adeguata.

In ogni caso, per ridurre l'influenza dei disturbi ambientali è utile ridurre la distanza con la sorgente sismica. Ciò si traduce con la necessità di aumentare il numero di sensori nell'area di indagine, rendendo più densa la rete di rilevamento. In questo scenario i sistemi di costo relativamente basso come SL06 unito a sensori SS45 sembra rappresentare una scelta vincente.

Nota

Modello Crostale Appennino Italia Centrale

Profondità [km]	Vp [km/s]	Vs [km/s]
0 – 1.1	3.0	1.64
1.1 – 1.9	5.5	3.0
1.9 – 11.0	6.0	3.28
11.0 – 38.0	6.5	3.55
> 38.0	8.05	4.4

Bibliografia

D. Bindi et al., Local and Duration Magnitudes in Northwestern Italy, and Seismic Moment Versus Magnitude Relationships, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 2, pp. 592–604, 2005;

Lockman A.B., and Allen, R.M., 2005. Single-Station Earthquake Characterization for Early Warning, Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 6, p. 2029–2039;

Noda, S., Yamamoto, S., Sato, S., Iwata, N., Korenaga, M., Ashiya, K., 2012. Improvement of back-azimuth estimation in real-time by using a single station record, Earth Planets Space, 64, 305–308;

Eisermann, A.S., Ziv, A., Wust-Bloch, G.H., 2015. Real-Time Back Azimuth for Earthquake Early Warning, Bulletin of the Seismological Society of America, 105, 4, 2274-2285.
