

Determinazione del Limite Superiore dello Shift Doppler Positivo per il Rilevamento di Meteore con Sistema Radar Bistatico GRAVES-IU2EFA

Un'analisi geometrica e fisica per la definizione della banda di ricezione superiore

Introduzione - Il Problema

- * Il Sistema:
 - * Trasmettitore (A): Radar GRAVES (Francia, 143.050 MHz)
 - * Ricevitore (B): Stazione IU2EFA in Pianura Padana (Italia)
 - * Configurazione: Bistatica (A e B separati)
 - * Distanza A-B (Baseline): 335 km
- * L'Obiettivo: Rilevare echi radar dalla testa delle meteore (plasma) durante l'ingresso atmosferico (altitudine M: 80-120 km).
- * La Sfida: Definire l'estremo superiore della banda di frequenza del ricevitore per garantire la cattura anche degli eventi più rari con il massimo shift Doppler *positivo* possibile.
- * Domanda Chiave: Qual è il massimo shift Doppler *positivo* che possiamo realisticamente aspettarci come limite fisico?

Il Fenomeno Fisico - Lo Shift Doppler Bistatico

- * Cos'è lo Shift Doppler? Variazione della frequenza ricevuta a causa del movimento del bersaglio (meteora) rispetto al trasmettitore e al ricevitore.
- * Formula Bistatica:
$$f_d = (v/\lambda) * (\cos(\theta_T) + \cos(\theta_R))$$
 - * f_d : Shift Doppler (Hz)
 - * v : Velocità della meteora (m/s)
 - * λ : Lunghezza d'onda del radar (~2.1 m per GRAVES)
 - * θ_T : Angolo tra velocità v e direzione A->M
 - * θ_R : Angolo tra velocità v e direzione M->B
- * Obiettivo Matematico: Massimizzare f_d positivo -> Massimizzare il termine $(\cos(\theta_T) + \cos(\theta_R))$.

Il Caso Limite - La Meteora Più Veloce

- * Velocità Massima: Le meteore più veloci sono quelle retrograde (orbitano in senso opposto alla Terra). La loro velocità di ingresso atmosferico può raggiungere i 72 km/s.
- * Perché considerarlo? Per definire il limite *superiore* della banda del ricevitore, dobbiamo considerare il caso fisico più estremo, anche se estremamente improbabile da osservare.
- * Dati Chiave:
 - * $v = 72000 \text{ m/s}$
 - * $\lambda \approx 2.097 \text{ m}$

Geometria Ideale vs. Realtà

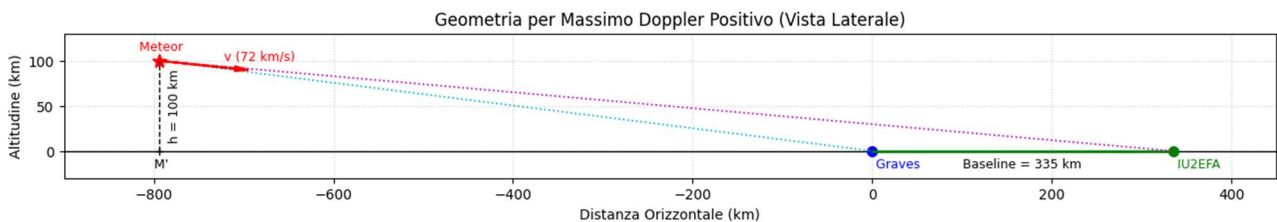
- * Massimo Teorico: Il termine $(\cos(\theta_T) + \cos(\theta_R))$ è massimo ($=2$) quando $\theta_T = 0^\circ$ e $\theta_R = 0^\circ$.
- * Significa: v parallela e concorde sia ad A->M che a M->B.
- * Questo richiederebbe A, M, B allineati -> Impossibile (M è a 100 km di quota).
- * Avvicinarsi al Massimo: Ci si avvicina a +2 quando:
 1. La meteora (M) è molto lontana dalla linea A-B (rispetto ai 335 km).
 2. La velocità v punta da M verso la linea A-B, allineandosi quasi perfettamente con le direzioni A->M e M->B (che diventano quasi parallele tra loro).

I Vincoli del Mondo Reale

- * 1. Altitudine Meteora: L'eco si forma a $\sim 100 \text{ km}$ (h).
- * 2. Curvatura Terrestre: Limita la visibilità. La distanza massima al suolo per vedere un oggetto a 100 km di quota è l'orizzonte radio.
 - * $D_{\text{orizzonte}} \approx \sqrt{2 * R_{\text{Terra}} * h} \approx 1129 \text{ km}$
 - * Questo è il limite dominante per la distanza di M.
- * 3. Ostacoli (Alpi): Si trovano tra A e B. Tuttavia, per le posizioni M molto lontane (vicine all'orizzonte) che massimizzano il Doppler, l'angolo di elevazione è sufficiente ($>5^\circ$) per "vedere" sopra le montagne. Le Alpi non sono il fattore limitante primario per questo scenario.

La Posizione Ottimale Realistica (M)

- * Per massimizzare il Doppler *positivo*, M deve essere il più lontano possibile, quindi vicino al limite dell'orizzonte radio comune ad A e B (~1129 km di distanza al suolo).
- * Dove? Due aree principali:
 - * Sul prolungamento della linea A-B: Es. M sopra M', con M' a 794 km da A e 1129 km da B.



- * Sulla perpendicolare al centro (O) di A-B: Es. M sopra M', con M' a ~1104 km da O (e 1129 km da A e B).

La Traiettoria Ottimale (v)

- * Non basta che M sia nella posizione giusta.
- * Per il massimo Doppler *positivo*, la meteora deve viaggiare a 72 km/s con una traiettoria (\vec{v}) che punta quasi esattamente da quella posizione M lontana verso la linea di base A-B.

Il Calcolo Finale - Massimo Doppler Positivo Realistico

- * Scenario Usato: M sul prolungamento, al limite dell'orizzonte (distanze AM \approx 800 km, BM \approx 1133 km).
- * Calcolo Angoli: Usando le coordinate precise, si calcolano i versori \vec{u}_{MA} , \vec{u}_{MB} e il versore ottimale \vec{u}_v .
- * Risultato Angoli:
 - * $\cos(\theta_T) \approx 0.99986$ (Angolo θ_T vicinissimo a 0°)
 - * $\cos(\theta_R) \approx 0.99981$ (Angolo θ_R vicinissimo a 0°)
- * Fattore Geometrico Reale: $\cos(\theta_T) + \cos(\theta_R) \approx 1.99967$ (Molto vicino a 2!)
- * Calcolo Doppler:
 - $f_{d_max} = (72000 / 2.097) * 1.99967$
 - $f_{d_max} \approx +68659 \text{ Hz}$

Conclusioni e Contesto Empirico

- * Limite Superiore Teorico: Il massimo shift Doppler *positivo* fisicamente possibile (anche se estremamente improbabile) per una meteora a 72 km/s nel sistema GRAVES-IU2EFA è di circa +68.7 kHz.
- * Implicazioni per il Ricevitore: Per garantire la cattura di *qualsiasi* evento fisicamente possibile, l'estremo superiore della banda di ricezione Doppler dovrebbe estendersi fino a +69 kHz (arrotondato per margine) rispetto alla frequenza centrale di 143.050 MHz.
- * Contesto - Osservazioni Empiriche (5 anni):
 - * Massimo Doppler *Positivo* Rilevato: +56 kHz
 - * Massimo Doppler *Negativo* Rilevato: -15 kHz
 - * *Nota:* Questi valori mostrano cosa è stato effettivamente osservato finora. La differenza tra il massimo positivo osservato (+56 kHz) e il limite teorico (+68.7 kHz) evidenzia la rarità della combinazione perfetta di velocità, geometria e traiettoria richiesta per raggiungere il limite fisico. I valori negativi osservati sono significativamente inferiori, suggerendo che le geometrie/traiettorie che producono forti Doppler negativi sono ancora più rare o meno efficienti nel produrre echi rilevabili in questo sistema.

Riepilogo

- * Abbiamo analizzato la fisica Doppler bistatica per trovare il limite *superiore*.
- * Identificato il caso limite (meteora retrograda 72 km/s).
- * Considerato i vincoli reali (curvatura terrestre, altitudine).
- * Determinato la geometria e traiettoria ottimali per il massimo Doppler *positivo*.
- * Calcolato il valore massimo *positivo* realistico: +68.7 kHz.
- * Contestualizzato questo limite teorico con i massimi valori empirici osservati (+56 kHz / -15 kHz).
- * Derivato il requisito per l'estremo superiore della banda del ricevitore (+69 kHz).

William IU2EFA