

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102011901954810A1

Publication Date

20121215

Applicant

THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Title

ACQUISIZIONE DI IMMAGINI SAR PER CALCOLARE UNA QUOTA O UN
MODELLO DIGITALE DI ELEVAZIONE TRAMITE ELABORAZIONI
INTERFEROMETRICHE.

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:
"ACQUISIZIONE DI IMMAGINI SAR PER CALCOLARE UNA QUOTA O UN
MODELLO DIGITALE DI ELEVAZIONE TRAMITE ELABORAZIONI
INTERFEROMETRICHE"

di THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

di nazionalità italiana

con sede: VIA SACCOMURO 24

ROMA (RM)

Inventore: CALABRESE Diego

* * *

SETTORE TECNICO DELL'INVENZIONE

La presente invenzione è relativa, in generale, all'interferometria basata su radar ad apertura sintetica ("Synthetic Aperture Radar" - SAR) ed, in particolare, ad un metodo di acquisizione di immagini SAR per calcolare una quota e/o un modello digitale di elevazione ("Digital Elevation Model" - DEM) tramite elaborazioni interferometriche.

STATO DELL'ARTE

Com'è noto, l'interferometria SAR sfrutta immagini di una stessa area della superficie terrestre che sono generate da sensori SAR trasportati a bordo di piattaforme satellitari o aeree al fine di rilevare spostamenti di un bersaglio ("target") presente in detta area (ed in questo

caso è chiamata interferometria differenziale), oppure al fine di ricostruire un DEM di detta area e/o di determinare la quota di singoli bersagli presenti in detta area. In particolare, un DEM è una rappresentazione in formato digitale della distribuzione delle quote in un'area di interesse.

Nel seguito, per semplicità di descrizione, verrà utilizzata la terminologia "sensore SAR" per indicare un radar ad apertura sintetica configurato per trasmettere e ricevere segnali radar in predeterminate direzioni tramite un'antenna.

Inoltre, nel seguito, sempre per semplicità di descrizione, verrà utilizzata la terminologia "acquisire un'immagine SAR", o, in modo equivalente, la terminologia "acquisizione di un'immagine SAR", per sottintendere l'intero processo di formazione di un'immagine SAR che, com'è noto, comprende:

- trasmettere, tramite un sensore SAR trasportato in volo da una piattaforma satellitare/aerea, ad esempio un satellite, un aereo o un velivolo a pilotaggio automatico ("Unmanned Aerial Vehicle" - UAV), segnali radar in modo tale da illuminare un'area di interesse con detti segnali radar;
- ricevere in una predeterminata direzione, tramite detto sensore SAR, i segnali radar retro-diffusi ("back-

scattered") da detta area; ed

- elaborare, tramite un'unità di elaborazione integrata nel sensore SAR stesso o collegata (anche remotamente) al sensore SAR, i segnali radar ricevuti in modo tale da formare, ovvero generare, un'immagine SAR di detta area sulla base dei segnali radar ricevuti ed elaborati.

Inoltre, nel seguito la predeterminata direzione in cui i segnali radar vengono ricevuti dal sensore SAR verrà indifferentemente chiamata, sempre per semplicità di descrizione, direzione di acquisizione, direzione in cui un'immagine SAR viene acquisita, o direzione in cui viene eseguita un'acquisizione di un'immagine SAR.

Attualmente, al fine di ricostruire un DEM di un'area della superficie terrestre e/o di determinare la quota di singoli bersagli presenti in detta area, vengono acquisite due immagini SAR di detta area, ciascuna immagine SAR essendo acquisita in una direzione di acquisizione che è ortogonale o quasi (al più poche unità di grado) alla direzione di volo del sensore SAR utilizzato per acquisire detta immagine SAR e trasportato in volo da una piattaforma satellitare/aerea. Nel seguito, tale geometria di acquisizione verrà chiamata geometria "quasi-zero-doppler".

A tal riguardo, in figura 1 viene mostrato schematicamente un esempio di detta geometria "quasi-zero-

doppler". In particolare, la figura 1 mostra:

- una prima direzione di volo $\vec{d}_1$;
- una seconda direzione di volo $\vec{d}_2$ sostanzialmente parallela alla prima direzione di volo $\vec{d}_1$;
- un bersaglio T di cui si vuole determinare la quota h ;
- un sistema di riferimento cartesiano definito da tre assi indicati in figura 1 con, rispettivamente, z , x , ed y , detti assi x ed y essendo tra loro ortogonali ed individuando un piano xy a quota nulla, detto asse z essendo ortogonale al piano xy ed alla prima direzione di volo $\vec{d}_1$ ed individuando la direzione lungo cui viene determinata la quota h del bersaglio T , detto asse x essendo parallelo a, ed orientato nello stesso verso di, detta prima direzione di volo $\vec{d}_1$;
- una prima acquisizione di un'immagine SAR del bersaglio T eseguita in una prima posizione di acquisizione S_1 lungo la prima direzione di volo $\vec{d}_1$, detta prima acquisizione essendo eseguita in una prima predeterminata direzione di acquisizione che è ortogonale alla prima direzione di volo $\vec{d}_1$ e che in figura 1 è individuata dal segmento $\overline{S_1T}$; ed
- una seconda acquisizione di un'immagine SAR del bersaglio T eseguita in una seconda posizione di acquisizione S_2 lungo la seconda direzione di volo $\vec{d}_2$,

detta seconda posizione di acquisizione S_2 essendo distanziata dalla prima posizione di acquisizione S_1 di una distanza b che nel seguito verrà chiamata baseline, detta seconda acquisizione essendo eseguita in una seconda predeterminata direzione di acquisizione che è ortogonale alla seconda direzione di volo $\vec{d}_2$ e che in figura 1 è individuata dal segmento $\overline{S_2T}$.

I segmenti $\overline{S_1T}$ e $\overline{S_2T}$ rappresentano percorsi di lunghezza differente. L'interferometria SAR è basata proprio sull'analisi della correlazione tra la quota h del bersaglio T e la differenza dei due percorsi $\overline{S_1T}$ e $\overline{S_2T}$ e, quindi, tra la quota h del bersaglio T e la differenza di fase nelle due immagini SAR acquisite.

Attualmente, al fine di ricostruire, ovvero calcolare, un DEM di un'area della superficie terrestre e/o di determinare, ovvero calcolare, la quota di singoli bersagli presenti in detta area, vengono utilizzate principalmente tre tecniche:

1) due sensori SAR installati a bordo di una singola piattaforma satellitare/aerea vengono usati per acquisire contemporaneamente immagini SAR di detta area (ad esempio, facendo riferimento alla figura 1, le due posizioni di acquisizione S_1 e S_2 rappresentano le posizioni di due sensori SAR distinti trasportati da una singola piattaforma satellitare/aerea); oppure

2) due sensori SAR, ciascuno dei quali è installato a bordo di una rispettiva piattaforma satellitare/aerea, vengono usati per acquisire contemporaneamente immagini SAR di detta area (ad esempio, facendo riferimento alla figura 1, le due posizioni di acquisizione S_1 e S_2 rappresentano le posizioni di due sensori SAR distinti trasportati da due piattaforme satellitari/aeree distinte); oppure

3) un singolo sensore SAR installato a bordo di una singola piattaforma satellitare/aerea viene utilizzato per acquisire immagini SAR di detta area durante successivi passaggi di detta singola piattaforma sopra detta area (ad esempio, facendo riferimento alla figura 1, le due posizioni di acquisizione S_1 e S_2 rappresentano due posizioni assunte da uno stesso sensore SAR in due passaggi successivi sopra al bersaglio T di una singola piattaforma satellitare/aerea che trasporta detto sensore SAR).

La prima tecnica richiede una complessa realizzazione e quindi implica costi molto elevati poiché la baseline b tra i due sensori SAR utilizzati deve essere dell'ordine di decine/centinaia di metri. Ad esempio, la missione di topografia radar basata su shuttle ("Shuttle Radar Topography Mission" - SRTM) utilizza un braccio per la separazione tra i due sensori SAR di circa 60 metri.

La seconda tecnica richiede l'utilizzo di due piattaforme in formazione abbastanza vicine tra loro. La

realizzazione di due piattaforme di questo tipo implica un costo molto elevato a causa della loro complessità, soprattutto nel caso di piattaforme satellitari. Esempi di sistemi satellitari in grado di funzionare nel suddetto modo sono COSMO-SkyMed in configurazione tandem (circa un secondo di distanza tra i due satelliti) e TerraSar-X tandem.

Infine, l'efficacia della terza tecnica è limitata a causa della distanza temporale tra due osservazioni consecutive di una stessa area da parte del singolo sensore SAR, ad esempio 16 giorni con COSMO-SkyMed e 24 giorni con RadarSat. Tale distanza temporale produce una limitata correlazione temporale permettendo la realizzazione di DEM solo per aree che mantengono le stesse caratteristiche elettromagnetiche dopo molti giorni, ad esempio aree vulcaniche o zone con basso livello di vegetazione.

OGGETTO E RIASSUNTO DELL'INVENZIONE

Scopo della presente invenzione, quindi, è quello di fornire un metodo di acquisizione di immagini SAR per elaborazioni interferometriche che sia in grado di alleviare gli svantaggi precedentemente descritti.

In particolare, con la presente invenzione si intende raggiungere lo scopo di ridurre i costi di sviluppo e di esercizio relativi alla generazione di mappe topografiche

tridimensionali e/o DEM tramite telerilevamento SAR da aereo e/o satellite.

Il suddetto scopo è raggiunto dalla presente invenzione in quanto essa è relativa ad un metodo di acquisizione di immagini SAR per elaborazioni interferometriche, ad un metodo di calcolo di una quota, ad un metodo di calcolo di un modello digitale di elevazione, ad un metodo di calcolo di un interferogramma, ad un metodo di calcolo di una mappa di coerenza, ad un sistema di telerilevamento SAR configurato per eseguire detto metodo di acquisizione di immagini SAR, ad un programma software per implementare detto metodo di calcolo di una quota, ad un programma software per implementare detto metodo di calcolo di un modello digitale di elevazione, ad un programma software per implementare detto metodo di calcolo di un interferogramma e ad un programma software per implementare detto metodo di calcolo di una mappa di coerenza, secondo quanto definito nelle rivendicazioni allegate.

In particolare, il metodo di acquisizione di immagini SAR per elaborazioni interferometriche secondo la presente invenzione comprende acquisire, tramite uno o più sensori SAR trasportati in volo, immagini SAR di una stessa area con una geometria di acquisizione tale da consentire un'elaborazione interferometrica di dette immagini SAR. Detto metodo di acquisizione di immagini SAR è

caratterizzato da una geometria di acquisizione in cui ogni immagine SAR dell'area viene acquisita in una rispettiva direzione di acquisizione che definisce un rispettivo angolo di squint rispetto alla direzione di volo, ed in cui gli angoli di squint sono tali da determinare un angolo medio di squint diverso da zero.

Convenientemente, l'angolo medio di squint è uguale a, o maggiore di, tre gradi.

Convenientemente, per ogni immagine SAR acquisita, la rispettiva direzione di acquisizione è ottenuta:

- direzionando elettronicamente la direttività dell'antenna del sensore SAR utilizzato per acquisire detta immagine SAR; e/o
- imponendo un movimento di beccheggio e/o imbardata a detto sensore SAR.

Preferibilmente, le immagini SAR sono acquisite tramite un solo sensore SAR che è trasportato in volo da una piattaforma aerea/satellitare, che utilizza una sola antenna e che acquisisce le immagini SAR in un solo passaggio della piattaforma aerea/satellitare.

Convenientemente, acquisire un'immagine SAR dell'area comprende:

- trasmettere segnali radar in modo tale da illuminare detta area con detti segnali radar;
- ricevere nella rispettiva direzione di acquisizione

i segnali radar retro-diffusi da detta area; ed

- elaborare i segnali radar ricevuti in modo tale da generare un'immagine SAR di detta area.

Inoltre, il metodo di calcolo di una quota secondo la presente invenzione comprende calcolare una quota di un bersaglio presente in un'area tramite un'elaborazione interferometrica di immagini SAR di detta area acquisite eseguendo il suddetto metodo di acquisizione di immagini SAR, detta elaborazione interferometrica essendo basata sulla geometria di acquisizione con cui sono state acquisite dette immagini SAR.

Il metodo di calcolo di un modello digitale di elevazione secondo la presente invenzione comprende calcolare un modello digitale di elevazione di un'area tramite un'elaborazione interferometrica di immagini SAR di detta area acquisite eseguendo il suddetto metodo di acquisizione di immagini SAR, detta elaborazione interferometrica essendo basata sulla geometria di acquisizione con cui sono state acquisite dette immagini SAR.

Il metodo di calcolo di un interferogramma secondo la presente invenzione comprende calcolare un interferogramma sulla base di immagini SAR di una stessa area acquisite eseguendo il suddetto metodo di acquisizione di immagini SAR.

Infine, il metodo di calcolo di una mappa di coerenza secondo la presente invenzione comprende calcolare una mappa di coerenza sulla base di immagini SAR di una stessa area acquisite eseguendo il suddetto metodo di acquisizione di immagini SAR.

BREVE DESCRIZIONE DEI DISEGNI

Per una migliore comprensione della presente invenzione, alcune forme preferite di realizzazione, fornite a puro titolo di esempio esplicativo e non limitativo, verranno ora illustrate con riferimento ai disegni annessi (non in scala), in cui:

- la Figura 1 mostra schematicamente la geometria di acquisizione attualmente utilizzata per acquisire immagini SAR di una stessa area della superficie terrestre al fine di ricostruire un modello digitale di elevazione di detta area e/o di determinare la quota di singoli bersagli presenti in detta area;

- le Figure 2 e 3 mostrano schematicamente due ulteriori geometrie di acquisizione differenti da quella mostrata in Figura 1;

- la Figura 4 mostra schematicamente un esempio della geometria di acquisizione utilizzata secondo la presente invenzione per acquisire immagini SAR di una stessa area di interesse al fine di ricostruire un modello digitale di

elevazione di detta area e/o di determinare la quota di singoli bersagli presenti in detta area;

- le Figure 5-10 mostrano grafici ottenuti tramite simulazioni al computer condotte dalla Richiedente al fine di validare la presente invenzione;

- le Figure 11, 12 e 13 mostrano un profilo di quota simulato al computer (figure 11 e 12) ed il corrispondente interferogramma (figura 13) ottenuto simulando al computer l'acquisizione di due immagini SAR secondo la presente invenzione; e

- le Figure 14-18 mostrano schematicamente cinque diverse strategie di acquisizione di immagini SAR secondo rispettive forme preferite di realizzazione della presente invenzione.

DESCRIZIONE DETTAGLIATA DI FORME PREFERITE DI REALIZZAZIONE DELL'INVENZIONE

La seguente descrizione viene fornita per permettere ad un tecnico del settore di realizzare ed usare l'invenzione. Varie modifiche alle forme di realizzazione presentate saranno immediatamente evidenti a persone esperte ed i generici principi qui divulgati potrebbero essere applicati ad altre forme realizzative ed applicazioni senza, però, per questo uscire dall'ambito di tutela della presente invenzione.

Quindi, la presente invenzione non deve essere intesa come limitata alle sole forme di realizzazione descritte e mostrate, ma le deve essere accordato il più ampio ambito di tutela coerentemente con i principi e le caratteristiche qui presentate e definite nelle rivendicazioni allegate.

Nel seguito, al fine di descrivere dettagliatamente la presente invenzione, saranno utilizzate le seguenti definizioni che sono ampiamente note nel settore dell'interferometria SAR:

- baseline: distanza tra due posizioni di acquisizione di due immagini SAR di una stessa area (nella figura 1, come precedentemente descritto, la baseline b è il segmento $\overline{S_1S_2}$);

- linea di vista: segmento che unisce il bersaglio ed una delle due posizioni di acquisizione che viene assunta come posizione in cui è eseguita l'acquisizione master (nella figura 1 la prima posizione di acquisizione S_1 è assunta come posizione dell'acquisizione master e, quindi, la linea di vista è il segmento $\overline{S_1T}$);

- differenza di percorso: differenza tra i due percorsi che uniscono il bersaglio alle due posizioni di acquisizione (nella figura 1, come precedentemente descritto, la differenza di percorso è la differenza tra i due percorsi $\overline{S_1T}$ e $\overline{S_2T}$);

- baseline ortogonale: componente della baseline che

è perpendicolare alla linea di vista (nella figura 1 la baseline ortogonale è rappresentata dal segmento indicato con b_1 che è ortogonale alla linea di vista $\overline{S_1T}$);

- baseline efficace: componente della baseline ortogonale che è parallela alla direzione lungo cui è misurata la quota del bersaglio (nella figura 1 la baseline efficace è rappresentata dal segmento indicato con b_e che è parallelo all'asse z); la presenza di una baseline efficace determina una correlazione tra la differenza di percorso e la quota di un determinato bersaglio e, quindi, consente l'interferometria;

- distanza di ambiguità interferometrica: distanza tra due bersagli che, a parità di quota, hanno la stessa differenza di percorso;

- baseline critica: il valore di baseline efficace per la quale la distanza di ambiguità interferometrica coincide con la risoluzione dell'immagine SAR;

- altezza di ambiguità: differenza di quota di un target che comporta una differenza di percorso pari alla lunghezza d'onda dei segnali radar utilizzati; e

- de-correlazione geometrica: de-correlazione causata dal fatto che uno stesso bersaglio è visto da due angoli differenti e, quindi, ha un comportamento in fase differente.

La presente invenzione è relativa ad un metodo di

acquisizione di immagini SAR per elaborazioni interferometriche, specificatamente ad un metodo per acquisire immagini SAR di una stessa area di interesse con una geometria di acquisizione tale da consentire un'elaborazione interferometrica di dette immagini SAR.

Inoltre, un primo specifico aspetto della presente invenzione concerne un metodo per ricostruire, ovvero calcolare, un DEM di un'area sulla base di immagini SAR di detta area acquisite eseguendo detto metodo di acquisizione di immagini SAR.

Inoltre, un secondo specifico aspetto della presente invenzione concerne un metodo per determinare, ovvero calcolare, la quota di un bersaglio presente in un'area sulla base di immagini SAR di detta area acquisite eseguendo detto metodo di acquisizione di immagini SAR.

Inoltre, un terzo specifico aspetto della presente invenzione concerne un metodo per generare, ovvero calcolare, un interferogramma sulla base di immagini SAR di una stessa area acquisite eseguendo detto metodo di acquisizione di immagini SAR.

Inoltre, un quarto specifico aspetto della presente invenzione concerne un metodo per generare, ovvero calcolare, una mappa di coerenza sulla base di immagini SAR di una stessa area acquisite eseguendo detto metodo di acquisizione di immagini SAR.

La presente invenzione nasce dall'idea avuta dalla Richiedente di utilizzare, al fine di acquisire immagini SAR di una stessa area di interesse, una geometria di acquisizione che è differente dalla geometria quasi-zero-doppler attualmente utilizzata e che nel seguito verrà chiamata geometria "squinted".

In particolare, in detta geometria "squinted" ogni immagine SAR viene acquisita in una rispettiva direzione di acquisizione che non è ortogonale alla direzione di volo del sensore SAR utilizzato per acquisire detta immagine SAR.

In dettaglio, secondo la presente invenzione, vengono acquisite immagini SAR di una stessa area di interesse utilizzando angoli di squint tali da determinare un angolo medio di squint diverso da zero in modo tale da generare una baseline efficace e, quindi, da consentire un'analisi interferometrica delle diverse immagini SAR acquisite.

Convenientemente, l'angolo medio di squint è uguale, o maggiore di, tre gradi.

Preferibilmente, le diverse immagini SAR vengono acquisite utilizzando un solo sensore SAR che ha una sola antenna, è trasportato in volo da una sola piattaforma satellitare/aerea ed acquisisce dette immagini SAR durante un solo passaggio della piattaforma satellitare/aerea.

Al fine di far comprendere al meglio la geometria di

acquisizione di immagini SAR secondo la presente invenzione, in figura 2 viene mostrata schematicamente una geometria di acquisizione ottenuta ruotando di 90° attorno all'asse z la geometria "quasi-zero-doppler" mostrata in figura 1. In particolare, la geometria di acquisizione di figura 2 è ottenuta spostando il bersaglio T e la baseline b di figura 1 lungo un'unica direzione di volo $\vec{d}_1 \equiv \vec{d}_2$. Per motivi di simmetria le relazioni interferometriche della geometria "quasi-zero-doppler" di figura 1 rimangono invariate nella geometria di acquisizione di figura 2. In particolare, la baseline efficace b_e della geometria quasi-zero-doppler di figura 1 e della geometria di acquisizione di figura 2 coincidono. In ogni caso, è importante far notare che la geometria di acquisizione mostrata in figura 2 rappresenta un caso assurdo in quanto un sensore SAR non può lavorare in una tale geometria di acquisizione poiché il ground range è parallelo alla direzione azimutale (asse x). Pertanto, nella geometria di acquisizione di figura 2 la risoluzione sarebbe possibile solo parallelamente all'asse x , mentre non si avrebbe risoluzione (o comunque sarebbe fortemente limitata) parallelamente all'asse y .

Inoltre, in figura 3 viene mostrata schematicamente un'ulteriore geometria di acquisizione in cui la baseline b è parallela all'unica direzione di volo $\vec{d}_1 \equiv \vec{d}_2$ ed il bersaglio T è equidistante dalle due posizioni di

acquisizione S_1 e S_2 . Nella geometria di acquisizione di figura 3 non è presente alcuna baseline efficace b_e . Pertanto, la differenza tra i due percorsi $\overline{S_1T}$ e $\overline{S_2T}$ non è correlata all'altezza h del bersaglio T osservato (infatti in questa geometria di acquisizione tale differenza è pari a zero) e, quindi, la differenza di fase nelle due immagini SAR non produce informazione utile alla stima della quota h del bersaglio T .

Infine, in figura 4 viene mostrato schematicamente un esempio della geometria di acquisizione "squinted" utilizzata, secondo la presente invenzione, per acquisire immagini SAR di una stessa area di interesse al fine di calcolare un DEM di detta area e/o al fine di calcolare la quota di singoli bersagli presenti in detta area.

In particolare, la geometria "squinted" mostrata in figura 4 rappresenta una soluzione geometrica intermedia tra le geometrie di acquisizione mostrate nelle figure 2 e 3. Infatti, per tutte le posizioni intermedie tra i due casi limite rappresentati dalle geometrie di acquisizione mostrate nelle figure 2 e 3, ossia per coppie di acquisizioni "squintate" ("squinted") aventi un valore medio di squint non nullo, si ha un valore non nullo della baseline efficace e, quindi, si ha la possibilità di eseguire elaborazioni interferometriche. In altre parole, la geometria di acquisizione "squinted" utilizzata dalla

presente invenzione per acquisire immagini SAR consente di ottenere una baseline efficace, permettendo così la formazione di immagini interferometriche e quindi consentendo un'elaborazione interferometrica delle immagini SAR acquisite.

In dettaglio, la figura 4 mostra:

- una direzione di volo $\vec{d}$;
- un bersaglio T di cui si vuole determinare la quota h ;
- un sistema di riferimento cartesiano definito da tre assi indicati in figura 4 con, rispettivamente, z , x , ed y , detti assi x ed y essendo tra loro ortogonali ed individuando un piano xy a quota nulla, detto asse z essendo ortogonale al piano xy ed alla direzione di volo $\vec{d}$ ed individuando la direzione lungo cui viene determinata la quota h del bersaglio T , detto asse x essendo parallelo a, ed orientato nello stesso verso di, detta direzione di volo $\vec{d}$;
- una prima acquisizione di un'immagine SAR del bersaglio T eseguita in una prima posizione di acquisizione S_1 lungo la direzione di volo $\vec{d}$, detta prima acquisizione essendo eseguita in una prima predeterminata direzione di acquisizione che in figura 4 è individuata dal segmento $\overline{S_1T}$ e che forma con la direzione di volo $\vec{d}$, nel piano individuato da detta direzione di volo $\vec{d}$ e dalla direzione

lungo cui è determinata la quota h del bersaglio T , ovvero nel piano zx , un primo angolo di squint ϑ_1 diverso da 90° (ovvero $\vartheta_1 \neq 90^\circ$); ed

- una seconda acquisizione di un'immagine SAR del bersaglio T eseguita in una seconda posizione di acquisizione S_2 lungo la direzione di volo $\vec{d}$, detta seconda posizione di acquisizione S_2 essendo distanziata dalla prima posizione di acquisizione S_1 di una baseline b , detta seconda acquisizione essendo eseguita in una seconda predeterminata direzione di acquisizione che in figura 4 è individuata dal segmento $\overline{S_2T}$ e che forma con la direzione di volo $\vec{d}$, nel piano individuato da detta direzione di volo $\vec{d}$ e dalla direzione lungo cui è determinata la quota h del bersaglio T , ovvero nel piano zx , un secondo angolo di squint ϑ_2 diverso da 90° e dal primo angolo di squint ϑ_1 (ovvero risulta che $\vartheta_2 \neq 90^\circ$ e $\vartheta_2 \neq \vartheta_1$).

Nella geometria "squinted" mostrata in figura 4 un primo percorso R_1 , ovvero il segmento $\overline{S_1T}$, unisce la prima posizione di acquisizione S_1 ed il bersaglio T . Come precedentemente descritto, detto primo percorso R_1 forma con la direzione di volo $\vec{d}$, nel piano individuato da detta direzione di volo $\vec{d}$ e dalla direzione lungo cui è determinata la quota h del bersaglio T , ovvero nel piano zx , il primo angolo di squint ϑ_1 diverso da 90° (ovvero $\vartheta_1 \neq 90^\circ$).

Allo stesso modo, un secondo percorso R_2 , ovvero il segmento $\overline{S_2T}$, unisce la seconda posizione di acquisizione S_2 ed il bersaglio T e detto secondo percorso R_2 forma con la direzione di volo $\vec{d}$, nel piano individuato da detta direzione di volo $\vec{d}$ e dalla direzione lungo cui è determinata la quota h del bersaglio T , ovvero nel piano zx , il secondo angolo di squint ϑ_2 diverso da 90° e dal primo angolo di squint ϑ_1 (ovvero risulta che $\vartheta_2 \neq 90^\circ$ e $\vartheta_2 \neq \vartheta_1$).

Poiché le due acquisizioni avvengono con due angoli di squint diversi ($\vartheta_2 \neq \vartheta_1$), ovvero con un angolo medio di squint non nullo, si ottiene un valore non nullo della baseline efficace b_e e, quindi, si ha la possibilità di eseguire elaborazioni interferometriche. In particolare, la differenza tra i due percorsi R_1 e R_2 , ovvero la differenza di percorso $\Delta R = R_1 - R_2$, corrisponde ad una differenza di fase nelle due immagini SAR acquisite sulla base della quale è possibile, conoscendo la geometria di acquisizione, ovvero la geometria "squinted", determinare la quota h del bersaglio T .

Quando due immagini SAR di una stessa area sono generate utilizzando due angoli differenti di osservazione, le due immagini SAR presentano differenti comportamenti in fase e, quindi, si ha una de-correlazione geometrica tra le due immagini SAR. Facendo sempre riferimento alla figura 4,

l'angolo che caratterizza tale de-correlazione geometrica è:

$$S_1 \hat{T} S_2 = \Delta\phi .$$

Una delle ipotesi alla base della presente invenzione è che la de-correlazione è funzione del valore assoluto dell'angolo $\Delta\phi$ e non del suo orientamento.

In generale, la de-correlazione geometrica si può esprimere come:

$$\frac{2 \cdot \Delta\phi \cdot R_{is}}{\lambda} ,$$

dove λ indica la lunghezza d'onda dei segnali radar trasmessi/ricevuti e R_{is} indica la risoluzione geometrica in range del sensore SAR utilizzato.

Come precedentemente descritto, le due acquisizioni di immagini SAR del bersaglio T sono preferibilmente eseguite utilizzando un singolo sensore SAR trasportato da una piattaforma satellitare/aerea. In particolare, detto sensore SAR acquisisce le due immagini SAR del bersaglio T durante un solo passaggio della piattaforma satellitare/aerea sopra l'area di interesse. In ogni caso, si vuole qui sottolineare che la presente invenzione può essere realizzata sfruttando anche due sensori SAR trasportati o entrambi da una singola piattaforma satellitare/aerea o ciascuno da una rispettiva piattaforma satellitare/aerea.

Convenientemente, i diversi angoli di squint utilizzati

per acquisire le diverse immagini SAR di una stessa area di interesse, ovvero le diverse direzioni squintate di acquisizione, possono essere ottenuti(e):

- utilizzando un'antenna SAR con fascio direzionabile elettronicamente ("electronically steerable beam antenna") e direzionando elettronicamente il fascio di segnali radar trasmessi/ricevuti dall'antenna del sensore SAR; e/o

- imponendo opportuni movimenti di beccheggio ("pitch") e/o imbardata ("yaw") alla piattaforma satellitare/aerea a bordo del quale è installato il sensore SAR o alla parte della piattaforma satellitare/aerea (ad esempio un braccio meccanico) a cui è accoppiato detto sensore SAR.

La Richiedente, al fine di validare la presente invenzione, ha condotto diverse simulazioni al computer volte a valutare la relazione tra la quota del bersaglio e la differenza dei percorsi al variare della geometria in termini di baseline, rollio ("roll") e beccheggio, considerando sia una geometria piana che una geometria ellissoidale.

Le simulazioni al computer condotte dalla Richiedente hanno dimostrato che anche per la geometria "squinted", come per quella convenzionale "quasi-zero-doppler", esiste una dipendenza lineare tra la quota del bersaglio e la differenza dei percorsi sensore-bersaglio. Tale dipendenza

è funzione dell'angolo medio di squint, dell'angolo di rollio e della baseline, e nel caso di angolo medio di squint nullo è prossima allo zero.

A tal riguardo, in figura 5 viene mostrato un primo grafico che rappresenta la differenza di percorso ΔR normalizzata rispetto alla lunghezza d'onda λ dei segnali radar utilizzati al variare della quota h del bersaglio e dell'angolo medio di squint. In particolare, il grafico di figura 5 è stato ottenuto ipotizzando una baseline di 2 Km, un angolo di rollio di 30° ed una quota del satellite che trasporta il sensore SAR di 619 Km.

Inoltre, in figura 6 viene mostrato un secondo grafico che rappresenta la coerenza al variare della quota h del bersaglio e dell'angolo medio di squint. Anche il grafico di figura 6 è stato ottenuto ipotizzando una baseline di 2 Km, un angolo di rollio di 30° ed una quota del satellite di 619 Km. Dal grafico di figura 6 è possibile notare come la coerenza non cambi al variare della quota del bersaglio.

L'accuratezza dell'altezza del DEM risulta essere una percentuale dell'altezza di ambiguità. Tale percentuale, tipicamente inferiore ad un decimo, è principalmente funzione della coerenza.

In figura 7 viene mostrato un terzo grafico che rappresenta la baseline al variare dell'angolo medio di squint e dell'angolo di rollio. Il grafico di figura 7 è

stato ottenuto ipotizzando una quota del satellite di 619 Km ed un'altezza di ambiguità di 25 m e quindi un'accuratezza verticale dell'ordine di qualche metro. Dal grafico di figura 7 è possibile notare come la baseline decresca all'aumentare dell'angolo medio di squint.

In figura 8 viene mostrato un quarto grafico che rappresenta la coerenza al variare dell'angolo medio di squint e dell'angolo di rollio. Anche il grafico di figura 8 è stato ottenuto ipotizzando una quota del satellite di 619 Km ed un'altezza di ambiguità di 25 m e quindi un'accuratezza verticale dell'ordine di qualche metro. Dal grafico di figura 8 è possibile notare come la coerenza aumenti all'aumentare dell'angolo medio di squint ed al diminuire dell'angolo di rollio.

In figura 9 viene mostrato un quinto grafico che rappresenta la differenza tra gli angoli di squint relativi alle due acquisizioni SAR al variare dell'angolo medio di squint e dell'angolo di rollio. Anche il grafico di figura 9 è stato ottenuto ipotizzando una quota del satellite di 619 Km ed un'altezza di ambiguità di 25 m e quindi un'accuratezza verticale dell'ordine di qualche metro. Dal grafico di figura 9 è possibile notare come la differenza tra gli angoli di squint relativi alle due acquisizioni SAR aumenti al diminuire dell'angolo medio di squint.

Infine, in figura 10 viene mostrato un sesto grafico

che rappresenta la perdita di risoluzione dovuta alla non ortogonalità tra le direzioni di ground range ed azimuth al variare dell'angolo medio di squint e dell'angolo di rollio. Anche il grafico di figura 10 è stato ottenuto ipotizzando una quota del satellite di 619 Km ed un'altezza di ambiguità di 25 m e quindi un'accuratezza verticale dell'ordine di qualche metro. Dal grafico di figura 10 è possibile notare come la perdita di risoluzione dovuta alla non ortogonalità tra le direzioni di ground range ed azimuth aumenti all'aumentare dell'angolo medio di squint.

Dai grafici mostrati nelle figure 5-10 si evince che la migliore regione di lavoro per l'angolo medio squint è tra 10° e 15° ; in tale intervallo, infatti, si hanno dei valori del tutto accettabili sia di coerenza che di perdita di risoluzione per non ortogonalità, in particolare valori di coerenza maggiori di 0.8 e valori di perdita di risoluzione per non ortogonalità minori di 0.2.

La figure 11, 12 e 13 mostrano un profilo di quota simulato al computer (rappresentato nelle figure 11 e 12 tramite scala di grigi, in particolare la figura 11 ne mostra una vista tridimensionale) ed il corrispondente interferogramma ottenuto simulando al computer l'acquisizione di due immagini SAR secondo la presente invenzione. In particolare, nell'interferogramma di figura 13 la differenza di fase è rappresentata tramite scala di

grigi. In dettaglio, l'interferogramma di figura 13 è stato ottenuto simulando al computer un angolo medio di squint di 15° , una baseline di 2.5 Km , un angolo di rollio di 30° , un coefficiente di correlazione di 0.9 , ed una risoluzione in ground range di 1 m .

Nelle figure 14-18 vengono mostrate schematicamente cinque diverse strategie di acquisizione di immagini SAR secondo rispettive forme preferite di realizzazione della presente invenzione.

In particolare, le figure 14-18 mostrano un satellite 10 che si muove lungo una direzione di volo $\vec{d}$ ed è equipaggiato con un sensore SAR (non mostrato per semplicità nelle figure 14-18) che acquisisce coppie di immagini SAR di una stessa area di interesse A utilizzando la geometria di acquisizione "squinted" secondo la presente invenzione. Preferibilmente, l'antenna utilizzata dal sensore SAR è un'antenna con fascio direzionabile elettronicamente montata sul satellite 10 in modo tale da poter guardare in avanti o indietro. Come descritto precedentemente, tale configurazione è ottenibile utilizzando anche il movimento di beccheggio del satellite 10.

In dettaglio,

- la figura 14 mostra schematicamente due coppie di acquisizioni squintate di immagini SAR dell'area A

realizzate tramite un primo modo operativo denominato "Squint Spot" (in figura 14 le due coppie di acquisizioni squintate essendo indicate, rispettivamente, con 11 e 12);

- la figura 15 mostra schematicamente due coppie di acquisizioni squintate di immagini SAR dell'area A realizzate tramite un secondo modo operativo denominato "Double Squint Strip" (in figura 15 le due coppie di acquisizioni squintate essendo indicate, rispettivamente, con 13 e 14);

- la figura 16 mostra schematicamente un'acquisizione fortemente squintata realizzata tramite un terzo modo operativo denominato "Strip Squint esteso" (in figura 16 l'acquisizione fortemente squintata essendo indicata con 15);

- la figura 17 mostra schematicamente due coppie di acquisizioni squintate di immagini SAR dell'area A realizzate tramite un quarto modo operativo denominato "StripScan Squint" (in figura 17 le due coppie di acquisizioni squintate essendo indicate, rispettivamente, con 16 e 17); e

- la figura 18 mostra schematicamente due coppie di acquisizioni squintate di immagini SAR dell'area A realizzate tramite un quinto modo operativo denominato "StripTops Squint" (in figura 18 le due coppie di acquisizioni squintate essendo indicate, rispettivamente,

con 18 e 19).

Andando ancor più nel dettaglio, il primo modo operativo denominato "Squint Spot" (rappresentato schematicamente in figura 14) prevede un'acquisizione spot fortemente squintata. Le due immagini SAR possono essere ottenute processando in maniera separata due parti dell'acquisizione.

Il secondo modo operativo denominato "Double Squint Strip" (rappresentato schematicamente in figura 15) prevede un'acquisizione a strisciata fortemente squintata di tipo interleaved, dedicando in maniera alternata le PRI (Pulse Repetition Interval) ai differenti angoli ottenendo, così, la stessa scena da angoli diversi.

Il terzo modo operativo denominato "Strip Squint esteso" (rappresentato schematicamente in figura 16) prevede un'acquisizione a strisciata fortemente squintata utilizzando un fascio molto esteso e sintetizzando tramite elaborazione a terra due immagini SAR separate aventi valori di squint differenti, ottenendo così la stessa scena da angoli diversi.

Il quarto modo operativo denominato "StripScan Squint" (rappresentato schematicamente in figura 17) prevede acquisizioni stripmap fortemente squintate, facendo variare l'angolo in modalità a burst ottenendo così la stessa scena da angoli diversi.

Infine, il quinto modo operativo denominato "StripTops Squint" (rappresentato schematicamente in figura 18) prevede acquisizioni TOPS fortemente squintate della stessa scena in burst separati ottenendo così la stessa scena da angoli diversi.

Dalla precedente descrizione si possono immediatamente comprendere i vantaggi della presente invenzione.

In particolare, è importante sottolineare che, al contrario delle tecniche attualmente in uso che prevedono l'utilizzo di passaggi multipli sopra una stessa area o il contemporaneo utilizzo di più sensori SAR posizionati su una o più piattaforme, la presente invenzione permette, invece, di generare un DEM tramite l'uso di un solo sensore SAR che viene trasportato in volo da un solo satellite/aereo e che osserva l'area di interesse con un solo passaggio del satellite/aereo ed utilizzando una sola antenna. Pertanto risulta chiaro che la presente invenzione consente di ridurre i costi di sviluppo e di esercizio relativi alla generazione di mappe topografiche tridimensionali e/o DEM di elevata accuratezza tramite telerilevamento SAR da aereo e/o satellite.

Inoltre, la presente invenzione non solo ottimizza gli aspetti economici e di prestazioni, ma introduce anche una maggiore flessibilità dell'utilizzo, permettendo la scelta della baseline in funzione della scena da riprendere.

Nella seguente tabella viene riportato schematicamente un sintetico confronto tra i costi, le prestazioni e la flessibilità della presente invenzione e delle tre principali tecniche attualmente utilizzate per generare mappe topografiche tridimensionali e/o DEM tramite telerilevamento SAR da satellite.

TECNICA	COSTO	PRESTAZIONI	FLESSIBILITA'
<i>Presente invenzione</i>	Basso	Elevate	Elevata
<i>Singolo satellite doppia antenna</i>	Elevato (distanza di decine di metri tra le due antenne)	Medie (baseline ridotte)	Bassa (baseline fissa)
<i>Doppio satellite</i>	Elevato (due satelliti, volo in formazione)	Elevate	Bassa (baseline variabile ma con vincoli imposti dal design orbitale)

<i>Singolo satellite doppio passaggio</i>	Basso	Basse (Alta decorrelazione temporale)	Media (valore di baseline vincolato dal controllo orbitale)
--	-------	--	--

In sintesi, la presente invenzione permette la generazione di DEM con prestazioni del tutto simili a quelle attualmente disponibili che prevedono l'utilizzo di sensori SAR, ma presenta costi di sviluppo e di esercizio notevolmente ridotti ed una maggiore flessibilità.

Infine, risulta chiaro che varie modifiche possono essere apportate alla presente invenzione, tutte rientranti nell'ambito di tutela dell'invenzione come definito nelle rivendicazioni allegate.

RIVENDICAZIONI

1. Metodo di acquisizione di immagini SAR per elaborazioni interferometriche, comprendente acquisire, tramite uno o più sensori SAR trasportati in volo, immagini SAR di una stessa area con una geometria di acquisizione tale da consentire un'elaborazione interferometrica di dette immagini SAR;

caratterizzato da una geometria di acquisizione in cui ogni immagine SAR dell'area viene acquisita in una rispettiva direzione di acquisizione che definisce un rispettivo angolo di squint rispetto alla direzione di volo, ed in cui gli angoli di squint sono tali da determinare un angolo medio di squint diverso da zero.

2. Il metodo della rivendicazione 1, in cui l'angolo medio di squint è uguale a, o maggiore di, tre gradi.

3. Il metodo secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui, per ogni immagine SAR acquisita, la rispettiva direzione di acquisizione è ottenuta:

- direzionando elettronicamente la direttività dell'antenna del sensore SAR utilizzato per acquisire detta immagine SAR; e/o
- imponendo un movimento di beccheggio e/o imbardata a detto sensore SAR.

4. Il metodo secondo una qualsiasi rivendicazione precedente, in cui le immagini SAR sono acquisite tramite

un solo sensore SAR che è trasportato in volo da una piattaforma aerea/satellitare, che utilizza una sola antenna e che acquisisce le immagini SAR in un solo passaggio della piattaforma aerea/satellitare.

5. Il metodo secondo una qualsiasi rivendicazione precedente, in cui acquisire un'immagine SAR dell'area comprende:

- trasmettere segnali radar in modo tale da illuminare detta area con detti segnali radar;
- ricevere nella rispettiva direzione di acquisizione i segnali radar retro-diffusi da detta area; ed
- elaborare i segnali radar ricevuti in modo tale da generare un'immagine SAR di detta area.

6. Metodo di calcolo di una quota, comprendente calcolare una quota di un bersaglio presente in un'area tramite un'elaborazione interferometrica di immagini SAR di detta area acquisite eseguendo il metodo di acquisizione di immagini SAR rivendicato in una qualsiasi rivendicazione precedente, detta elaborazione interferometrica essendo basata sulla geometria di acquisizione con cui sono state acquisite dette immagini SAR.

7. Metodo di calcolo di un modello digitale di elevazione, comprendente calcolare un modello digitale di elevazione di un'area tramite un'elaborazione interferometrica di immagini SAR di detta area acquisite

eseguendo il metodo di acquisizione di immagini SAR rivendicato in una qualsiasi rivendicazione 1-5, detta elaborazione interferometrica essendo basata sulla geometria di acquisizione con cui sono state acquisite dette immagini SAR.

8. Metodo di calcolo di un interferogramma, comprendente calcolare un interferogramma sulla base di immagini SAR di una stessa area acquisite eseguendo il metodo di acquisizione di immagini SAR rivendicato in una qualsiasi rivendicazione 1-5.

9. Metodo di calcolo di una mappa di coerenza, comprendente calcolare una mappa di coerenza sulla base di immagini SAR di una stessa area acquisite eseguendo il metodo di acquisizione di immagini SAR rivendicato in una qualsiasi rivendicazione 1-5.

10. Sistema di telerilevamento SAR comprendente una piattaforma aerea/satellitare ed un sensore SAR installato a bordo di detta piattaforma aerea/satellitare, il sistema essendo configurato per eseguire il metodo di acquisizione di immagini SAR rivendicato in una qualsiasi rivendicazione 1-5.

11. Prodotto software comprendente porzioni di codice software caricabili in una memoria di un processore, eseguibili da detto processore e tali da causare, quando eseguite, che detto processore diventi configurato per:

- eseguire un'elaborazione interferometrica di immagini SAR di una stessa area acquisite eseguendo il metodo di acquisizione di immagini SAR rivendicato in una qualsiasi rivendicazione 1-5, detta elaborazione interferometrica essendo basata sulla geometria di acquisizione con cui sono state acquisite dette immagini SAR; e

- calcolare una quota di un bersaglio presente in detta area sulla base dell'elaborazione interferometrica eseguita.

12. Prodotto software comprendente porzioni di codice software caricabili in una memoria di un processore, eseguibili da detto processore e tali da causare, quando eseguite, che detto processore diventi configurato per:

- eseguire un'elaborazione interferometrica di immagini SAR di una stessa area acquisite eseguendo il metodo di acquisizione di immagini SAR rivendicato in una qualsiasi rivendicazione 1-5, detta elaborazione interferometrica essendo basata sulla geometria di acquisizione con cui sono state acquisite dette immagini SAR; e

- calcolare un modello digitale di elevazione di detta area sulla base dell'elaborazione interferometrica eseguita.

13. Prodotto software comprendente porzioni di codice

software caricabili in una memoria di un processore, eseguibili da detto processore e tali da causare, quando eseguite, che detto processore diventi configurato per calcolare un interferogramma sulla base di immagini SAR di una stessa area acquisite eseguendo il metodo di acquisizione di immagini SAR rivendicato in una qualsiasi rivendicazione 1-5.

14. Prodotto software comprendente porzioni di codice software caricabili in una memoria di un processore, eseguibili da detto processore e tali da causare, quando eseguite, che detto processore diventi configurato per calcolare una mappa di coerenza sulla base di immagini SAR di una stessa area acquisite eseguendo il metodo di acquisizione di immagini SAR rivendicato in una qualsiasi rivendicazione 1-5.

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO

TITLE: SAR IMAGE ACQUISITION FOR COMPUTING A HEIGHT OR A
DIGITAL ELEVATION MODEL BY INTERFEROMETRIC PROCESSING

CLAIMS

1. A method for acquiring SAR images for interferometric processing, comprising acquiring, by means of one or more flight-borne SAR sensor(s), SAR images of one and the same area with an acquisition geometry such that to enable an interferometric processing of said SAR images;

characterised by an acquisition geometry in which each SAR image of the area is acquired in a respective acquisition direction that defines a respective squint angle with respect to the flight direction, and in which the squint angles are such that to determine a mean squint angle different from zero.

2. The method of claim 1, wherein the mean squint angle is equal to, or greater than, three degrees.

3. The method according to claim 1 or 2, wherein, for each acquired SAR image, the respective acquisition direction is obtained by:

- electronically steering the directivity of the antenna of the SAR sensor used to acquire said SAR image; and/or
- imposing a pitch and/or yaw movement to said SAR sensor.

4. The method according to any preceding claim, wherein the SAR images are acquired by means of a single SAR sensor which is borne in flight by an air/satellite platform, which uses a single antenna and acquires the SAR images in a single passage of the air/satellite platform.

5. The method according to any preceding claim, wherein acquiring a SAR image of the area comprises:

- transmitting radar signals so as to illuminate said area with said radar signals;
- receiving in the respective acquisition direction the radar signals back-scattered from said area; and
- processing the received radar signal so as to generate a SAR image of said area.

6. A method for computing a height, comprising computing a height of a target in an area by an interferometric processing of SAR images of said area acquired by carrying out the method for acquiring SAR images claimed in any preceding claim, said interferometric processing being based on the acquisition geometry with which said SAR images have been acquired.

7. A method for computing a digital elevation model, comprising computing a digital elevation model of an area by an interferometric processing of SAR images of said area acquired by carrying out the method for acquiring SAR images claimed in any claim 1-5, said interferometric

processing being based on the acquisition geometry with which said SAR images have been acquired.

8. A method for computing an interferogram, comprising computing an interferogram on the basis of SAR images of one and the same area acquired by carrying out the method for acquiring SAR images claimed in any claim 1-5.

9. A method for computing a coherence map, comprising computing a coherence map on the basis of SAR images of one and the same area acquired by carrying out the method for acquiring SAR images claimed in any claim 1-5.

10. A System for SAR remote sensing comprising an air/satellite platform and a SAR sensor installed on board said air/satellite platform, the system being configured to carry out the method for acquiring SAR images claimed in any claim 1-5.

11. A software program product comprising software code portions loadable in a memory of a processor, executable by said processor and such that to cause, when executed, said processor to become configured to:

- carry out an interferometric processing of SAR images of one and the same area acquired by carrying out the method for acquiring SAR images claimed in any claim 1-5, said interferometric processing being based on the acquisition geometry with which said SAR images have been acquired; and

- computing a height of a target in said area on the basis of the interferometric processing carried out.

12. A software program product comprising software code portions loadable in a memory of a processor, executable by said processor and such that to cause, when executed, said processor to become configured to:

- carry out an interferometric processing of SAR images of one and the same area acquired by carrying out the method for acquiring SAR images claimed in any claim 1-5, said interferometric processing being based on the acquisition geometry with which said SAR images have been acquired; and

- compute a digital elevation model of said area on the basis of the interferometric processing carried out.

13. A software program product comprising software code portions loadable in a memory of a processor, executable by said processor and such that to cause, when executed, said processor to become configured to compute an interferogram on the basis of SAR images of one and the same area acquired by carrying out the method for acquiring SAR images claimed in any claim 1-5.

14. A software program product comprising software code portions loadable in a memory of a processor, executable by said processor and that to cause, when executed, said processor to become configured to compute a coherence map on the basis of SAR images of one and the same area acquired by carrying out the method for acquiring SAR images claimed in any claim 1-5.

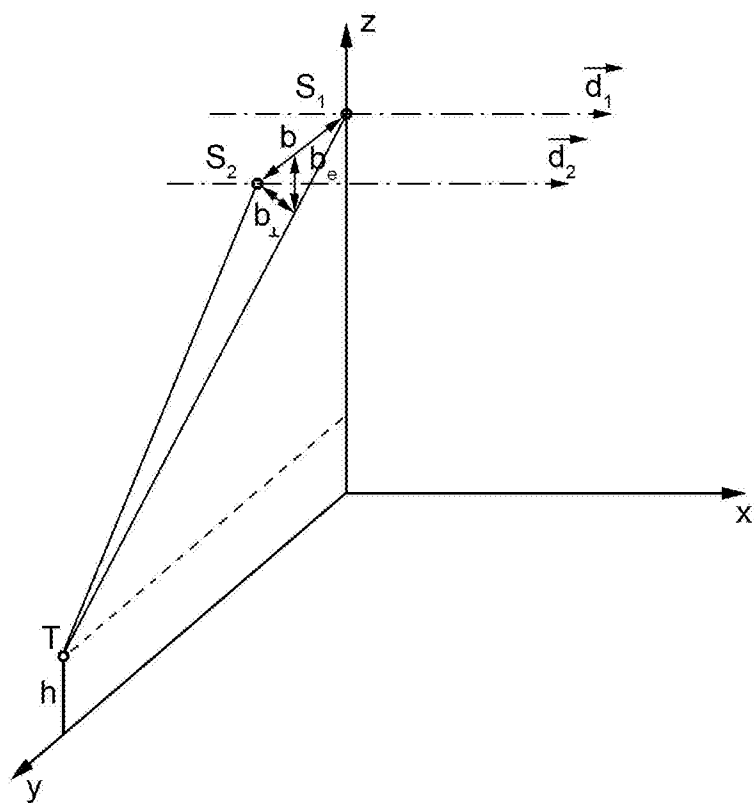


FIG. 1

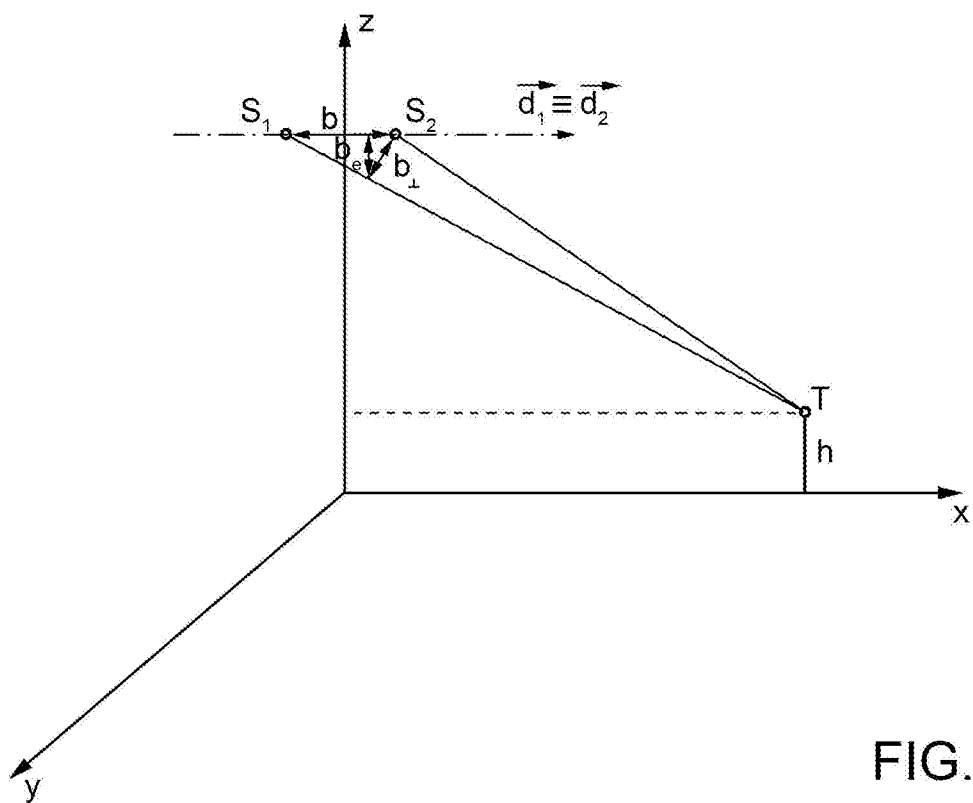


FIG. 2

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)

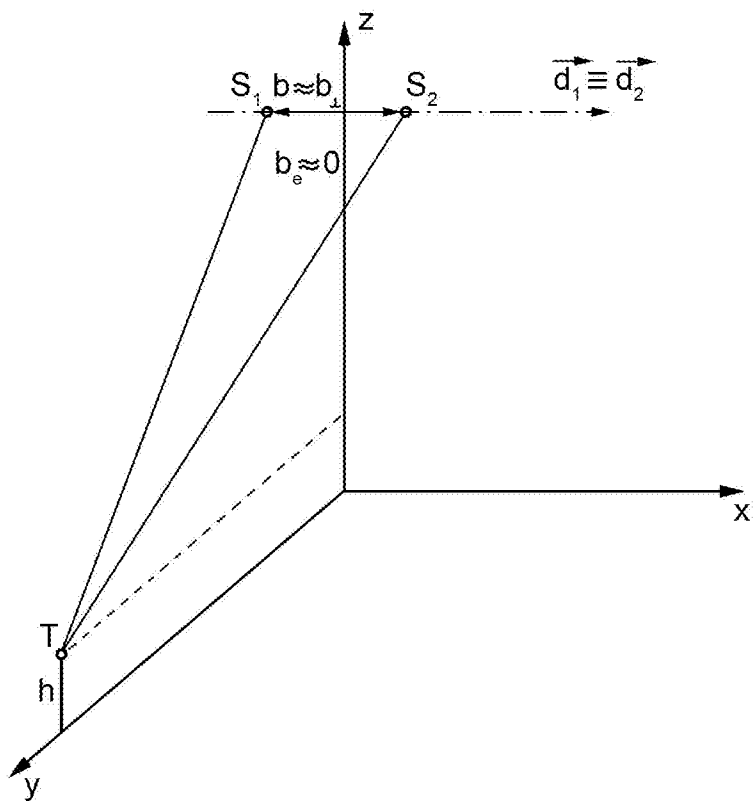


FIG. 3

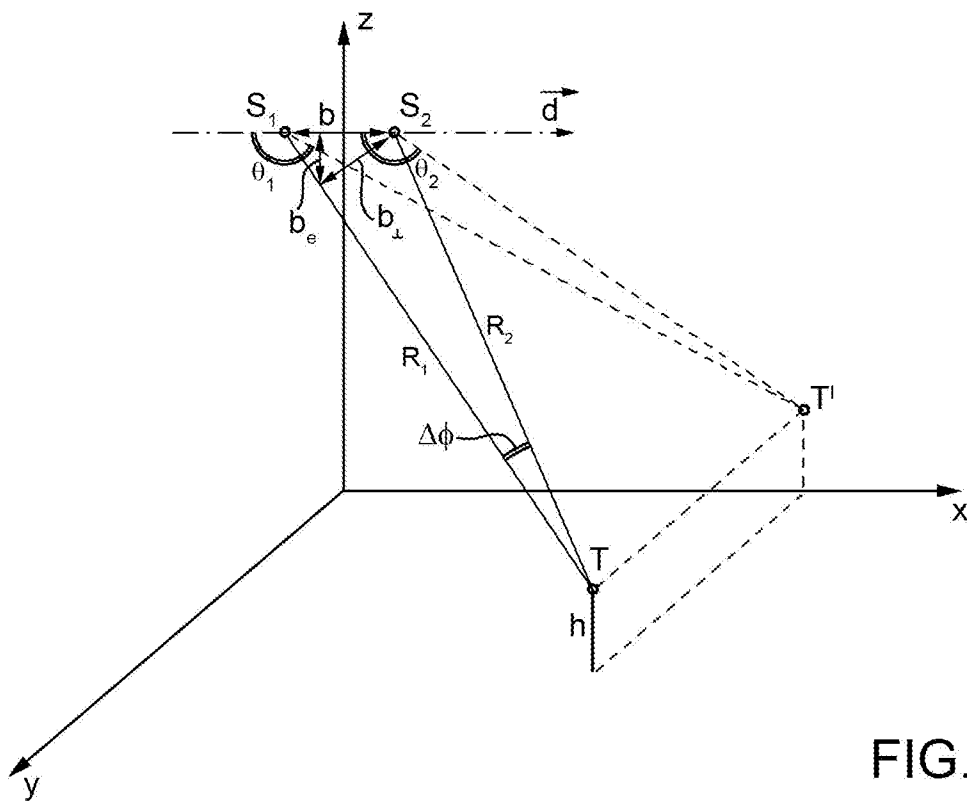


FIG. 4

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)

DIFFERENZA DI PERCORSO NORMALIZZATA FUNZIONE DELLA
QUOTA DEL BARSAGLIO E DELL'ANGOLO MEDIO DI SQUINT
BASELINE = 2 Km - ANGOLO DI ROLLIO = 30° - QUOTA DEL SATELLITE = 619 Km

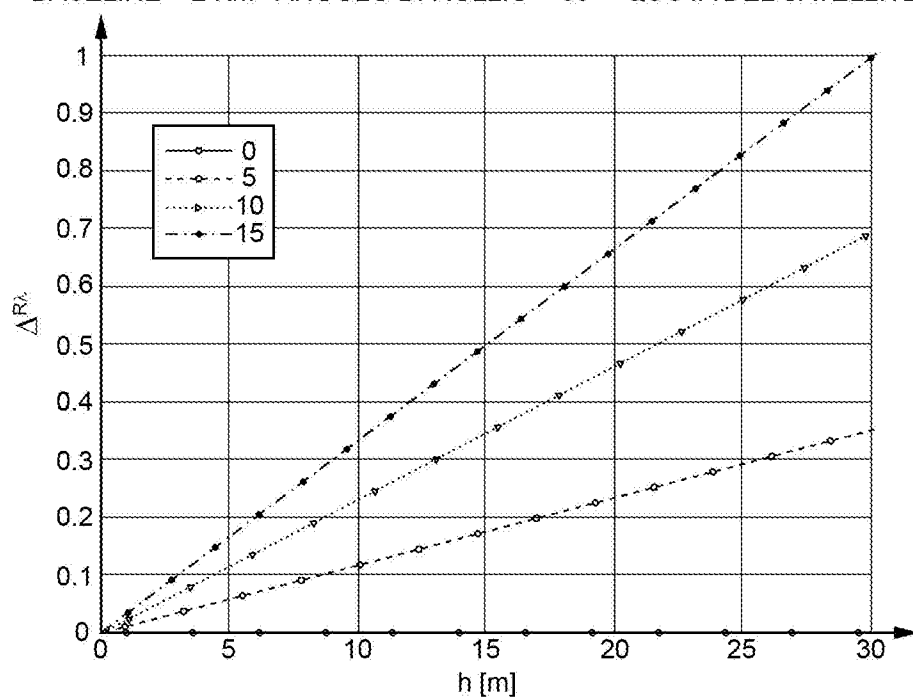


FIG. 5

COERENZA FUNZIONE DELLA QUOTA DEL
BERSAGLIO E DELL'ANGOLO MEDIO DI SQUINT
BASELINE = 2 Km ANGOLO DI ROLLIO = 30° - QUOTA DEL SATELLITE = 619 Km

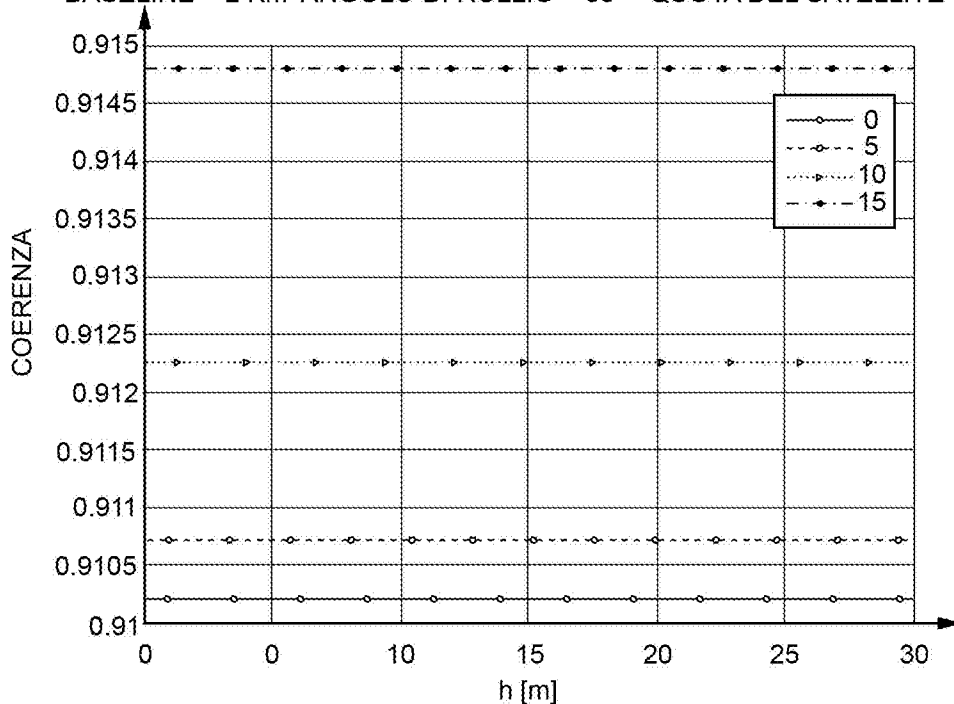


FIG. 6

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)

BASELINE vs ANGOLO MEDIO DI SQUINT vs ANGOLO DI ROLLIO
 QUOTA DEL SATELLITE = 619 km - ALTEZZA DI AMBIGUITA' = 25 m

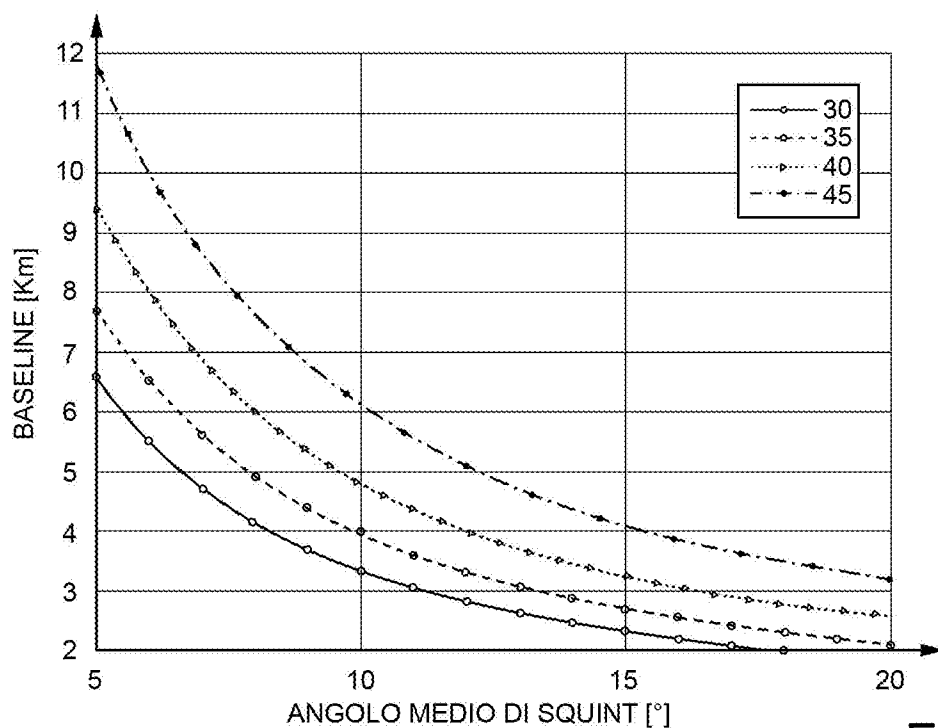


FIG. 7

COERENZA vs ANGOLO MEDIO DI SQUINT vs ANGOLO DI ROLLIO
 QUOTA DEL SATELLITE = 619 km - ALTEZZA DI AMBIGUITA' = 25 m

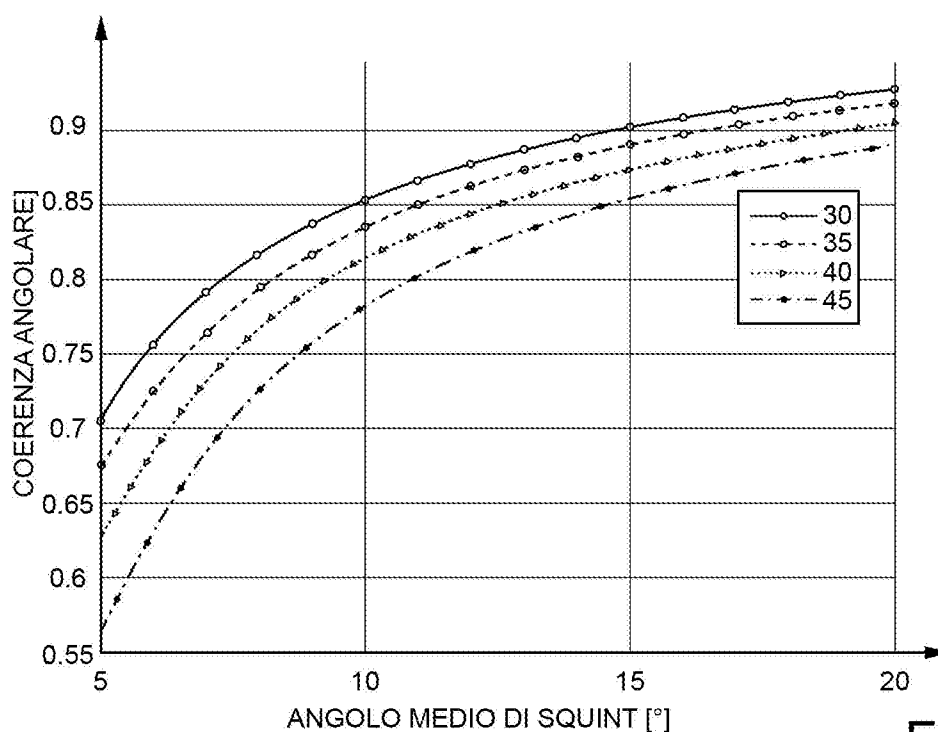


FIG. 8

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
 (Iscrizione Albo nr. 843/BM)

MAX ELECTRONIC STEERING vs ANGOLO MEDIO DI SQUINT vs ANGOLO DI ROLLIO
 QUOTA DEL SATELLITE = 619 Km - ALTEZZA DI AMBIGUITA' = 25 m

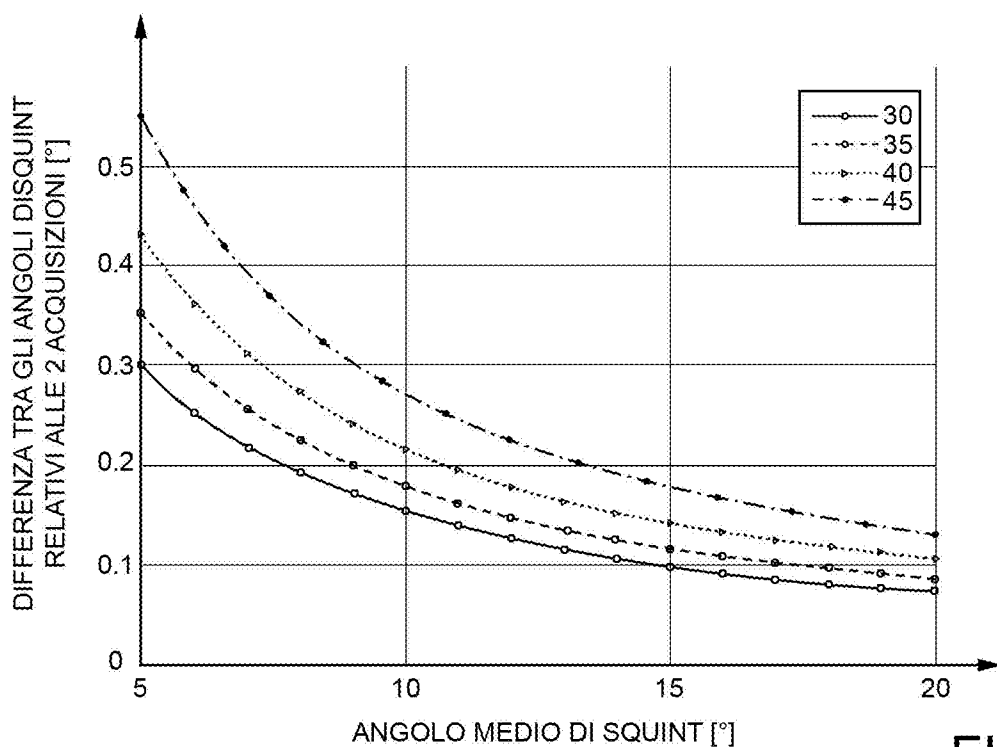


FIG. 9

PERDITA DI RISOLUZIONE IN RANGE PER NON
 ORTOGONALITA' vs ANGOLO MEDIO DI SQUINT vs ANGOLO DI ROLLIO
 QUOTA DEL SATELLITE = 619Km - ALTEZZA DI AMBIGUITA' = 25 m

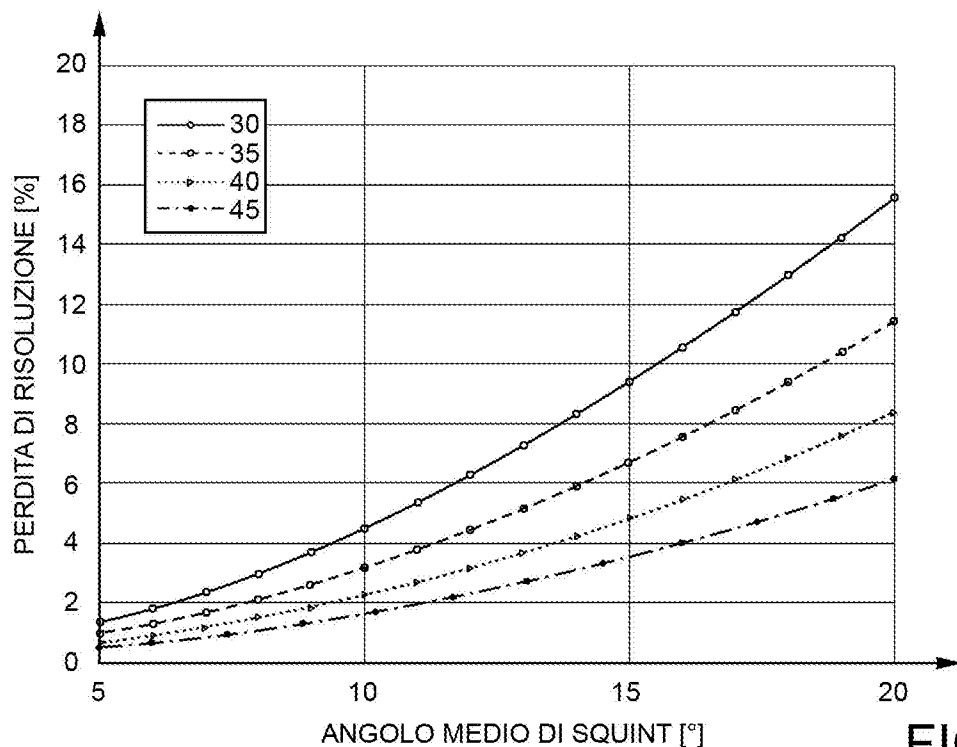


FIG. 10

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
 (Iscrizione Albo nr. 843/BM)

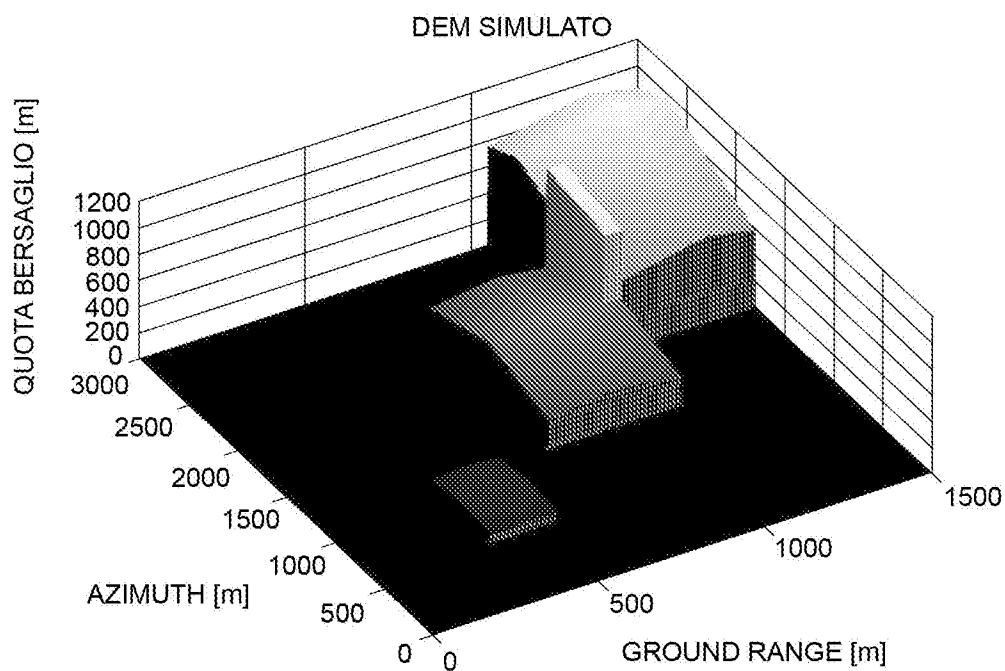


FIG. 11

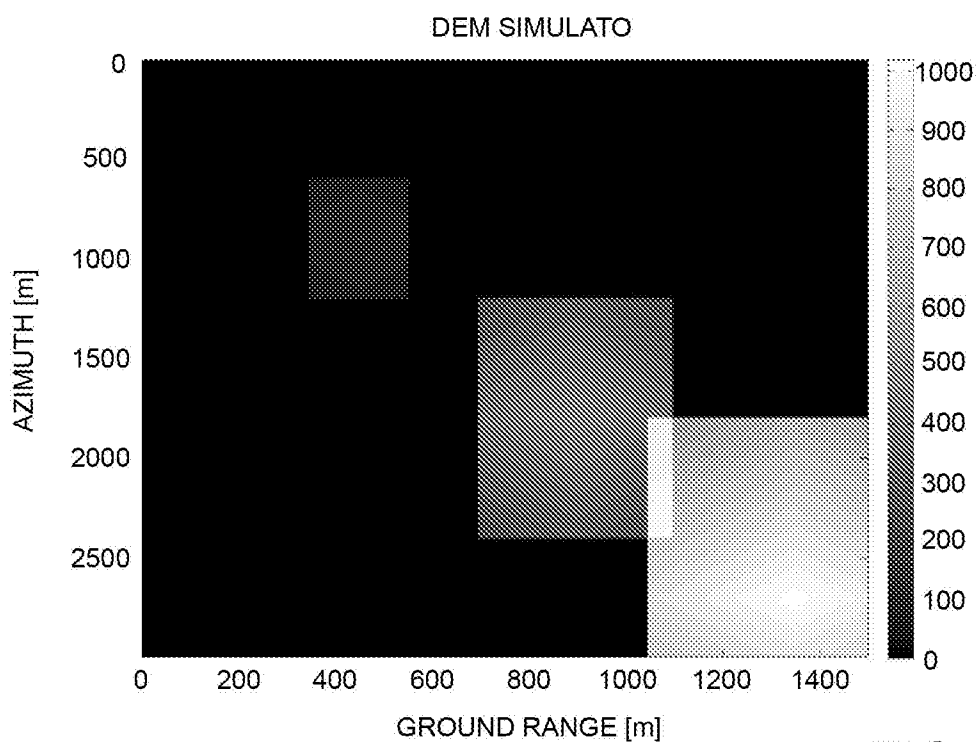


FIG. 12

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)

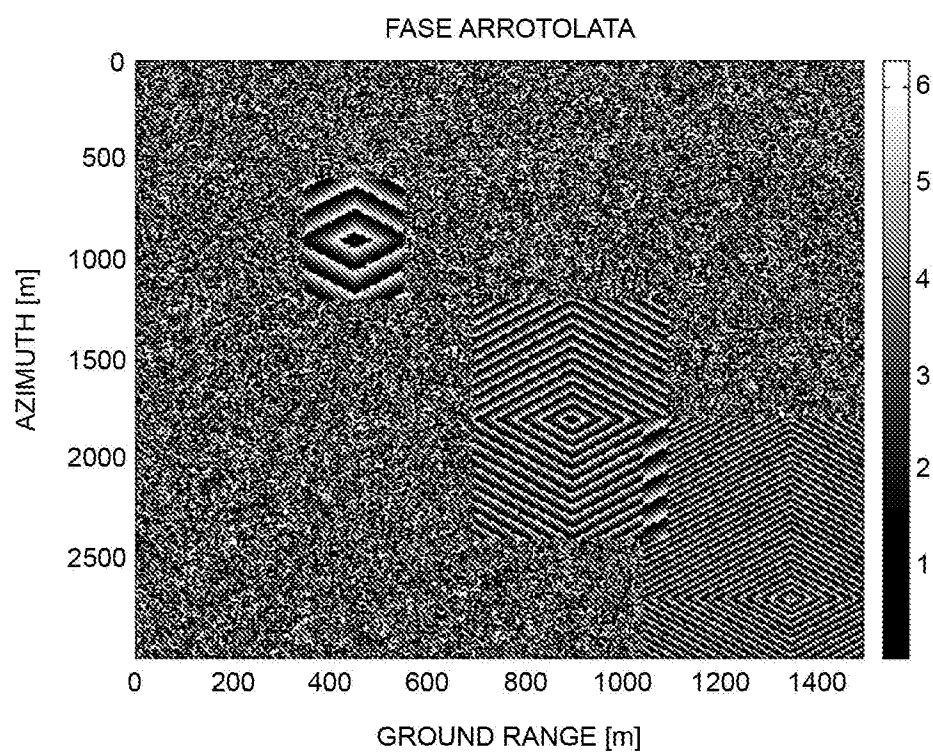


FIG. 13

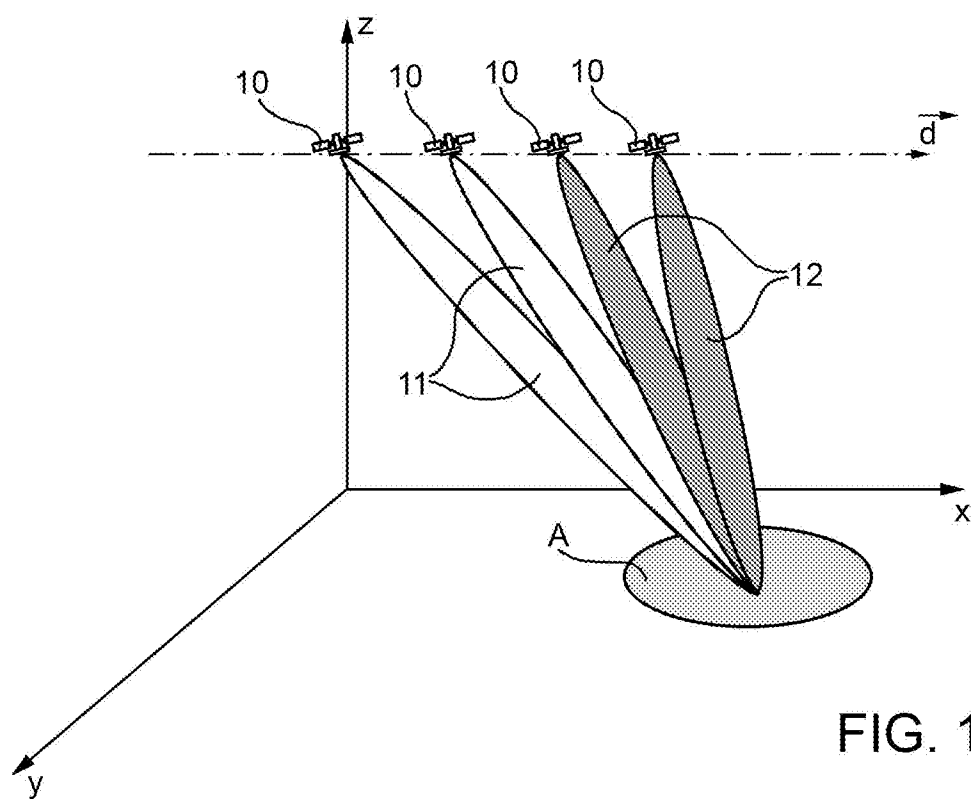


FIG. 14

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)

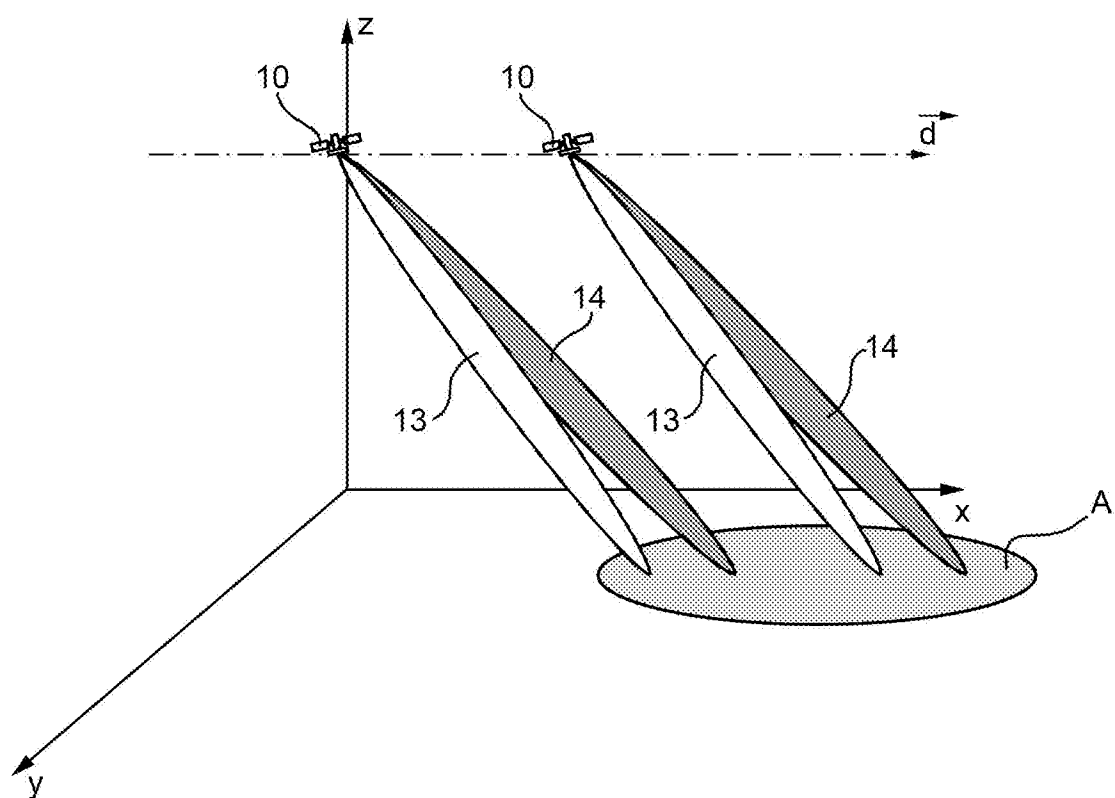


FIG. 15

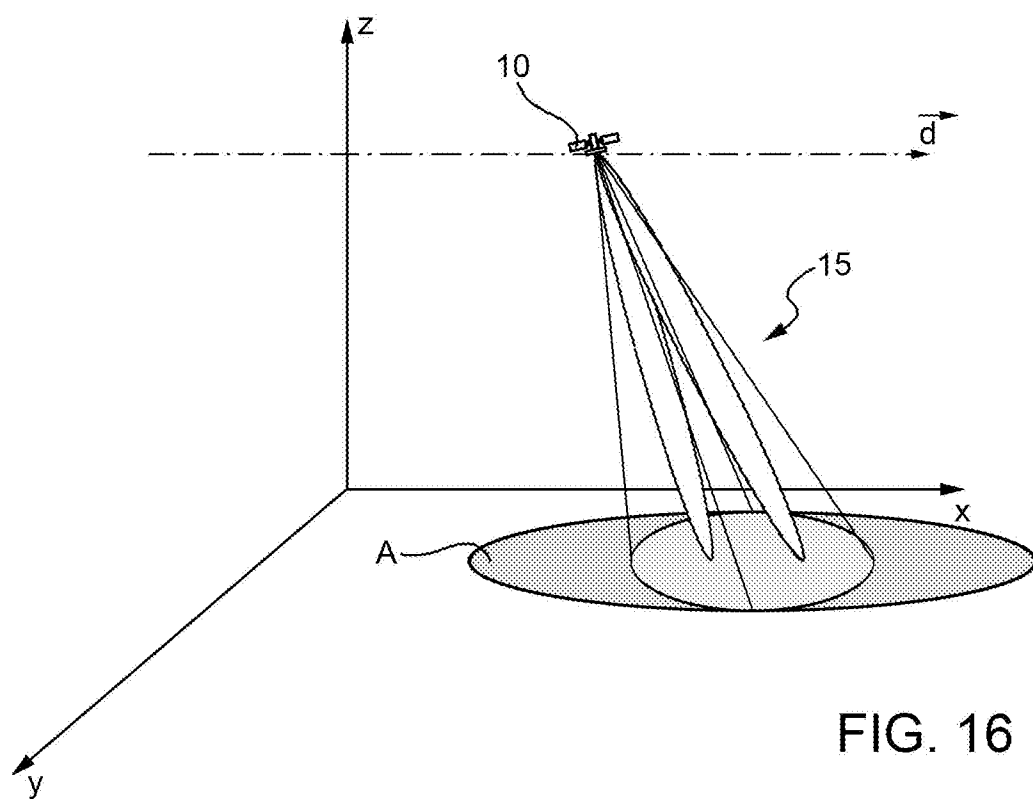


FIG. 16

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)

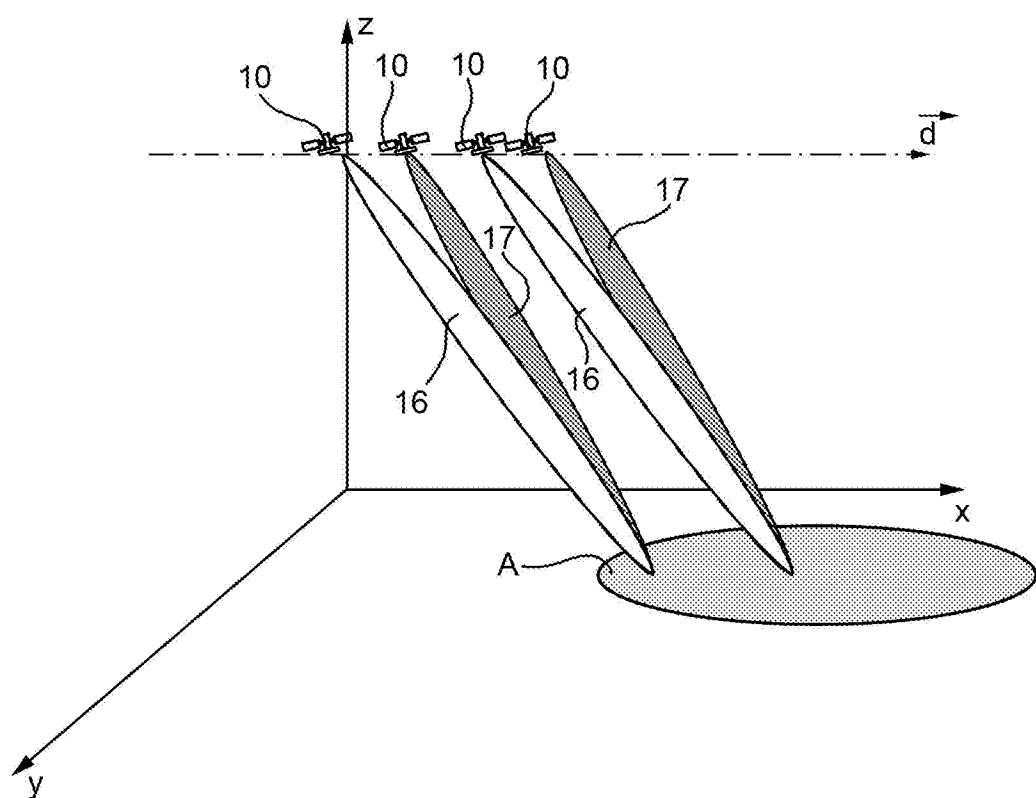


FIG. 17

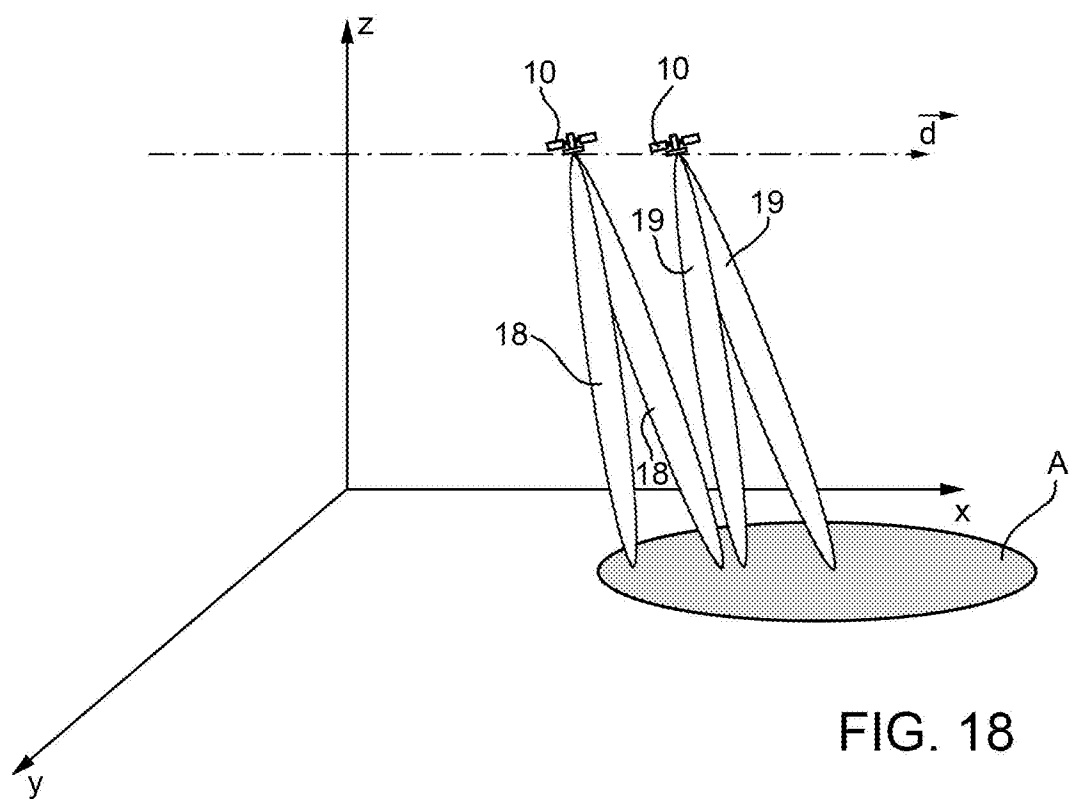


FIG. 18

p.i.: THALES ALENIA SPACE ITALIA S.P.A. CON UNICO SOCIO

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)