



Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”

*Master in Ingegneria e Diritto Internazionale dello Spazio nei Sistemi
Satellitari di Comunicazione, Navigazione e Sensing Satellitare*

L'IMPIEGO DEI SISTEMI SATELLITARI PER LA SORVEGLIANZA MARITTIMA

Relatori:

Dott. Alessandro Cricenti
Prof.ssa Ernestina Cianca

Candidato:

T.V. (AN) Filippo Manni

Anno Accademico 2017/2018

<i>INTRODUZIONE</i>	4
<i>1. IMPORTANZA STRATEGICA DEL DOMINIO MARITTIMO</i>	5
1.1 <i>Maritime Domain Awareness</i>	5
1.2 <i>Global Maritime Situational Awareness</i>	6
1.3 <i>Maritime Threat Awareness</i>	6
1.4 <i>Cooperazione internazionale</i>	7
<i>2. CARATTERISTICHE GENERALI DEL CONTESTO OPERATIVO DEL SISTEMA</i>	8
2.1 <i>Strumenti operativi di terra per la pianificazione e l'interpretazione delle immagini SAR</i>	8
2.1.1 <i>Sottomissione delle richieste di acquisizione ed analisi di fattibilità</i>	8
2.1.2 <i>Pianificazione</i>	9
2.2 <i>Presentazione immagine</i>	10
<i>3. SCENARI OPERATIVI</i>	11
3.1 <i>Imbarcazioni in transito in aree interdette alla navigazione</i>	11
3.2 <i>Commerci illegali</i>	12
3.3 <i>Pirateria</i>	12
3.4 <i>Controllo flussi migratori</i>	14
<i>4. STUDIO ORBITALE E VALUTAZIONI DI TIME PERFORMANCE</i>	16
4.1 <i>Obiettivi dello studio e applicativi impiegati</i>	16
4.2 <i>Design della costellazione e valutazione del Revisit Time</i>	17
4.2.1 <i>Costruzione della costellazione</i>	18
4.2.2 <i>Caso di imbarcazioni impegnate nel traffico di esseri umani nel Mediterraneo</i>	27
4.2.3 <i>Completamento della costellazione per la copertura del Mediterraneo Allargato</i>	30
4.3 <i>System Response Time</i>	35
4.3.1 <i>Considerazioni di progetto</i>	35
4.3.2 <i>Sviluppo di un programma in MATLAB per l'analisi del System Response Time</i>	38
4.3.3 <i>Valutazione del System Response Time</i>	42
<i>CONCLUSIONI</i>	44
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	46

INTRODUZIONE

Il tirocinio, svolto presso Thales Alenia Space Italia (sede di Roma), è stato incentrato sull'impiego dei sistemi satellitari per la sorveglianza marittima. I principali obiettivi dell'attività sono l'analisi dei requisiti utente, la definizione degli scenari e degli aspetti operativi, lo studio orbitale e la valutazione delle prestazioni per un sistema satellitare dedicato al monitoraggio dei mari.

Al fine di contestualizzare i temi trattati, l'elaborato introduce il concetto di *Maritime Domain Awareness*, di derivazione militare. Tale argomento viene quindi ampliato ed approfondito nelle sue componenti principali, la *Maritime Threat Awareness* e la *Global Maritime Situational Awareness*. Quest'ultima in particolare è strettamente connessa alla sorveglianza marittima, dal momento che il monitoraggio continuo dello scenario è il presupposto per la consapevolezza di ciò che sta accadendo in mare.

Compreso che un sistema satellitare dedicato all'osservazione dei mari incrementerebbe le capacità di sorveglianza già garantite dai mezzi terrestri e navali, l'elaborato prosegue ricercandone i requisiti e delineandone gli aspetti operativi. Viene dunque descritta la configurazione dei fatti illeciti più diffusi e di interesse e sono illustrati i comportamenti tipici dei trasgressori, le tipologie dei mezzi utilizzati e le aree geografiche in cui gli atti hanno generalmente luogo. Tali informazioni costituiscono importanti *driver* per la progettazione del sistema, in particolare per quanto riguarda la costruzione della costellazione, la scelta dei sensori ed il *tuning* degli algoritmi di rivelazione ed identificazione.

Per concludere, l'elaborato approfondisce gli aspetti di studio orbitale e le valutazioni di *performance* del sistema. Vengono descritti i motivi che hanno portato alla selezione di determinate orbite e viene costruita la costellazione, secondo un processo incrementale di inclusione di *asset*. Le soluzioni trovate vengono quindi confrontate in termini sia di tempi di rivisita, che, sulla base di un certo numero di ipotesi architetturali, di tempi di risposta del sistema.

1. IMPORTANZA STRATEGICA DEL DOMINIO MARITTIMO

1.1 *Maritime Domain Awareness*

La Marina Militare Italiana (MMI) concentra quotidianamente le proprie risorse su porzioni di mare sia interne che esterne alle acque territoriali. Le capacità di *detection*, *tracking* e previsione delle azioni degli oppositori storici vengono continuamente affinate, sebbene nel prossimo futuro le minacce da fronteggiare saranno anche di tipo non tradizionale, in gergo dette “asimmetriche”. Inoltre, la MMI sta assumendo un ruolo sempre più preminente in attività non tradizionali, come il soccorso in caso di catastrofi ed il controllo dei flussi migratori, nonché dei traffici di esseri umani.

Oggi la maggior parte dei traffici commerciali a livello mondiale avviene via mare. Gli oceani rappresentano, infatti, le principali arterie per il trasporto delle merci, ma costituiscono anche un valido mezzo per chi gestisce attività illecite e criminose. Le organizzazioni terroristiche sanno bene infatti, come sfruttare i mari per traffici di merci illegali, spostamenti di equipaggiamenti e combattenti e lancio di attacchi. Ne consegue lo sforzo della MMI di rendere sicura la realtà marittima, nell’ottica di garantire la prosperità del contesto economico e promuovere la stabilità politica.

Il tentativo è tuttavia vano se la minaccia, qualsiasi essa sia, non è individuabile né stimabile. La presenza di un ambiente così complesso aumenta esponenzialmente la difficoltà del processo valutativo, comportando ritardi ed incertezze decisionali. Di qui l’importanza di una consapevolezza globale di ciò che accade nei mari, attraverso la collezione, l’integrazione e la disseminazione delle informazioni e lo sviluppo di conoscenze. Un’efficace comprensione del dominio marittimo consente attività militari e di *law enforcement* meglio focalizzate, supporta i processi decisionali a livello strategico e le capacità di risposta alle minacce, promuovendo al contempo libertà, diritti civili e prosperità. È pertanto cruciale una forte sinergia tra l’attività operativa, l’intelligence e le capacità di comunicazione e raccolta delle informazioni per esercitare un controllo globale sui mari.

La *Maritime Domain Awareness* (MDA) è definita come la piena consapevolezza di tutto ciò che attiene al dominio marittimo che ha la capacità di impattare sulla sicurezza, l’economia e l’ambiente. Il livello di consapevolezza richiesto è quello tale da rendere disponibili agli organi decisionali, con idoneo anticipo, tutte le informazioni necessarie (contenuti, schemi comportamentali, cambiamenti, potenziali minacce, ecc.) per poter adottare le azioni appropriate.

La MDA è quindi composta da un lato da ciò che può essere osservabile e noto a livello globale (*Global Maritime Situational Awareness* - GMSA), dall'altro da ciò che può essere atteso o sospettato (*Maritime Threat Awareness* - MTA).

1.2 *Global Maritime Situational Awareness*

Condizione necessaria, ma non sufficiente, per conseguire una vera MDA è stabilire una robusta GMSA, capace mettere in collegamento tra loro le identità, le posizioni, i pattern, le attività ed i rischi a queste associati delle imbarcazioni, dei cargo e delle persone che operano all'interno del dominio marittimo o comunque a contatto con esso. Sebbene non esaustiva, questa lista mette in luce la varietà delle informazioni che contribuiscono alla GMSA e lascia percepire come queste siano difficilmente collezionabili da una sola nazione: tipicamente, infatti, un singolo stato può riuscire (con fatica) a conseguire solo una buona *Maritime Situational Awareness* di tipo regionale, quindi specifica per le acque prossime al proprio territorio. Un quadro più complesso e denso può allora essere costruito soltanto mediante la forte collaborazione tra più nazioni/agenzie attive nel dominio marittimo. Ad ogni modo, sia a livello regionale che globale, è chiaro che le capacità di monitoraggio continuo e, quindi, di sorveglianza dello scenario marittimo costituiscono il presupposto per la consapevolezza di ciò che sta accadendo in mare.

1.3 *Maritime Threat Awareness*

Riuscire a prevedere le azioni dei vari attori del dominio marittimo, sia amici che oppositori, è di fondamentale importanza per chi ha la gestione operativa dello strumento navale. Tale capacità di anticipazione richiede una valutazione costante dell'area di operazioni volta al riconoscimento di comportamenti anomali/sospetti che siano correlabili a possibili minacce. La valutazione accurata di trend e anomalie presuppone la profonda conoscenza delle differenti tipologie di minaccia. Quest'ultima è il derivato della fusione dei dati intelligence con l'esperienza del personale e la conoscenza della normativa regionale. L'analisi forense ha scoperto che la maggioranza della attività terroristiche è preceduta da eventi criminali o comportamenti anomali. La correlazione tra

atti criminosi e comportamenti insoliti nel dominio marittimo richiede una valutazione continua di quest'ultimo e strumenti automatici per la segnalazione di possibili attività sospette.

1.4 Cooperazione internazionale

Nessuna nazione o agenzia da sola ha le capacità per conseguire la MDA. Risulta dunque necessaria un'ampia collaborazione tra più soggetti, ciascuno dei quali contribuisce a realizzare una MDA comune. Tale azione di cooperazione si concretizza principalmente nelle seguenti attività:

- Vengono create piattaforme per il collegamento e la fusione dei dati delle reti di *Maritime Situational Awareness* (MSA) regionali dei singoli partner, con l'obiettivo di realizzare una GMSA condivisa.
- Vengono scambiate informazioni relative a potenziali minacce ed attività sospette, in modo che tutti i partner siano consapevoli degli stessi pericoli e comportamenti illeciti.
- Vengono adottati standard per la trasmissione dei dati identificativi e di posizionamento da parte delle imbarcazioni e per la loro diffusione tra i partner (analogamente a quanto fatto dall'*International Civil Aviation Organization*, ICAO, nel campo dell'aviazione civile).

2. CARATTERISTICHE GENERALI DEL CONTESTO OPERATIVO DEL SISTEMA

2.1 Strumenti operativi di terra per la pianificazione e l'interpretazione delle immagini SAR

Il Segmento di Terra del sistema di osservazione SAR dovrà garantire agli utenti strumenti idonei per:

- la sottomissione delle richieste di acquisizione di nuove immagini;
- l'analisi di fattibilità delle richieste;
- la pianificazione delle richieste (in modo da gestire i conflitti tra queste e le risorse di sistema).

Nel caso di singolo utente, le funzioni di fattibilità e pianificazione dovranno rientrare in un unico *tool*.

2.1.1 Sottomissione delle richieste di acquisizione ed analisi di fattibilità

Un *tool* dovrà consentire a ciascun utente di sottomettere più di una richiesta di acquisizione e di eseguirne l'analisi di fattibilità. Al fine di consentire una pre-analisi di fattibilità direttamente all'utente in fase di compilazione della richiesta, il sistema dovrà:

- avvisare ciascun utente se la richiesta che sta componendo è in palese conflitto geometrico con quella già pianificata da un altro utente;
- rendere disponibili, nel caso di singolo utente, le informazioni di quella che sarebbe la disponibilità residua del sistema ad acquisire ulteriori immagini, se la richiesta fosse pianificata (e.g. numero di immagini o minuti di strisciata residui);
- informare l'utente del tempo residuo per l'invio alla pianificazione di ciascuna sua richiesta, in considerazione delle caratteristiche della richiesta stessa.

La richiesta di acquisizione potrà partire dalle coordinate di un punto di interesse, direttamente inseribili nel sistema. Il *tool* dovrà inoltre consentire la visualizzazione di una mappa del globo, zoomabile, sulla quale individuare le aree di interesse. Una volta individuato un punto, sulla base delle sue coordinate o direttamente sulla mappa, il sistema restituirà all'operatore:

- latitudine e longitudine del punto selezionato;
- l'indicazione delle successive *Data Take Opportunity* (DTO);
- l'indicazione dell'orario previsto di disponibilità all'utente dell'immagine interpretata per ciascuna DTO (e.g. *System Response Time*);
- la visualizzazione sulla mappa dell'area effettivamente acquisibile da ciascuna DTO.

Le richieste potranno essere sottomesse scegliendo tra le possibili modalità di acquisizione (*scansar*, *stripmap*, *spotlight*). In fase di fattibilità sarà possibile visualizzare su mappa l'estensione dell'area acquisibile.

Una volta compilata la richiesta ed assegnatale una priorità sarà possibile effettuare la pianificazione.

2.1.2 Pianificazione

Un *tool* dovrà valutare ciascuna richiesta di acquisizione alla luce delle caratteristiche del sistema: vincoli geometrici, meccanici, termici ed energetici della piattaforma e del *payload*, memoria disponibile, geometria di acquisizione, ecc. Il *tool* ha il compito di elaborare il piano di missione in modo da attuare le richieste di acquisizione degli utenti. Il software dovrà ricercare possibili conflitti tra le richieste di acquisizione pervenute, sia sotto il profilo tecnico (e.g. vincoli di sistema) che operativo (e.g. gestione delle priorità). Gli eventuali contrasti saranno risolti sulla base delle diverse priorità delle acquisizioni e dei profili di utenza.

In considerazione dell'elevata valenza operativa e dell'utilizzo tattico oltreché strategico del sistema, la pianificazione dovrà avere uno *scheduling* preciso, da definirsi sulla base delle caratteristiche e delle risorse del sistema stesso. Dovrà essere possibile sia una pianificazione di tipo programmato, per il monitoraggio costante delle aree di interesse, che una pianificazione di acquisizioni urgenti, per l'inseguimento di bersagli e, più in generale, per attività intelligence.

In caso di singolo utente, la fattibilità e la pianificazione saranno effettuate contemporaneamente e a valle delle verifiche di ciascuna richiesta in caso negativo, il *tool* restituirà un allarme all'utente, indicando la motivazione per cui la pianificazione non sia andata a buon fine.

2.2 Presentazione immagine

Tutte le immagini restituite dovranno essere interpretate. Ogni traccia rivelata dovrà essere proiettata sulla mappa di cui al para. 2.1.1 e le dovrà essere assegnato un simbolo. Ogni traccia, una volta selezionata, dovrà riportare le indicazioni di:

- classificazione (qualora possibile, in base alla modalità di acquisizione selezionata);
- immagine radar della traccia;
- posizione e rotta stimate tramite l'utilizzo delle immagini dal radar;
- presenza/assenza dato AIS;
- obbligatorietà di possesso di transponder AIS (ALERT in caso il transponder sia obbligatorio ma non attivo);
- indicazione di integrità del dato AIS ricevuto (ALERT in caso di tentativo di manomissione del dato);
- disattivazione/attivazione del transponder AIS, nel caso la stessa traccia venga riconosciuta in due immagini successive (ALERT di disattivazione/attivazione transponder AIS);
- dati AIS.

Una traccia con dato AIS, anche se non selezionata, dovrà distinguersi da quelle non dotate di dato AIS. Una traccia con ALERT, anche se non selezionata, dovrà distinguersi dalle altre. Dovranno esistere opportuni filtri che permettano di isolare le tracce con/senza ALERT e/o con/senza AIS. Le tracce di bersagli non navali dovranno essere opportunamente riconoscibili.

3. SCENARI OPERATIVI

3.1 Imbarcazioni in transito in aree interdette alla navigazione

Qualsiasi tipologia di imbarcazione potrebbe trovarsi a transitare all'interno di acque interdette alla navigazione. È tuttavia più frequente trovare in queste acque imbarcazioni di piccole/medie dimensioni. Tali imbarcazioni possono essere sia ferme che in movimento.

Un operatore che desidera monitorare alcune aree interdette alla navigazione, prima di richiedere un'acquisizione, attiverà sulla mappa la visualizzazione di suddette aree. A questo punto sceglierà in quale punto eseguire l'acquisizione e, secondo le opportunità proposte dal sistema, a che ora e con quale modalità. Sulla base dell'analisi di un'immagine precedente, l'operatore potrebbe anche essersi affidato al sistema per farsi suggerire il nuovo punto di acquisizione.

Alla ricezione dell'immagine, oltre a quanto riportato al para. 2.2, il sistema dovrà:

- segnalare un ALERT per le imbarcazioni che si trovano all'interno dell'area interdetta, che riporti anche la distanza dal bordo dell'area;
- segnalare un ALERT per le imbarcazioni che, per rotta e velocità sostenute, sono in procinto di entrare/è verosimile che entreranno nell'area interdetta, che riporti anche la distanza dal bordo dell'area ed il tempo stimato di sconfinamento.

Selezionando un'imbarcazione, il sistema dovrà fornire all'operatore le informazioni di cui al para. 2.1.1 per ottenere un'acquisizione centrata sulla posizione futura stimata (al momento della successiva acquisizione) della traccia.

In generale, l'operatore dovrà poter scegliere se:

- eseguire la successiva acquisizione dove suggerito dal sistema per seguire una determinata imbarcazione;
- eseguire la successiva acquisizione secondo le modalità di puntamento sulla mappa ed indicazione delle coordinate cui al para. 2.1.1.

3.2 Commerci illegali

Lo scambio illecito di merci/carburanti tra due imbarcazioni avviene spesso lontano dalla costa, al di fuori delle acque territoriali di uno stato. Durante l'atto, le due imbarcazioni sono affiancate o comunque distanti non più di 400m e percorrono la stessa rotta, ad una velocità di circa 1-2kn. Tipicamente l'imbarcazione che cede il materiale è una nave tra i 50-100m di lunghezza, mentre l'imbarcazione che lo riceve può avere stazza analoga o inferiore (generalmente comunque maggiore di 25m). Terminata l'attività, le due imbarcazioni assumono rotte divergenti e si separano. È probabile che imbarcazioni impegnate in queste attività tengano spento il sistema AIS.

Sulla base di indirizzamenti esterni o del suggerimento del sistema a seguito dell'analisi di un'immagine precedente, un operatore sceglierà in quale punto eseguire l'acquisizione e, secondo le opportunità proposte dal sistema, a che ora e con quale modalità.

Alla ricezione dell'immagine, oltre a quanto riportato nel para. 2.2, il sistema dovrà segnalare un ALERT per le imbarcazioni con le dimensioni indicate che si trovino lontano dalla costa, che siano affiancate o a breve distanza tra loro (distanza inferiore ai 400m) e che avanzino con uguale rotta e velocità (inferiore ai 3kn). Selezionando una delle due imbarcazioni, il sistema dovrà fornire all'operatore le informazioni di cui al para. 2.1.1 per ottenere un'acquisizione centrata sulla posizione futura stimata (al momento della successiva acquisizione) della traccia.

In generale, l'operatore dovrà poter scegliere se:

- eseguire la successiva acquisizione dove suggerito dal sistema per seguire una determinata imbarcazione;
- eseguire la successiva acquisizione secondo le modalità di puntamento sulla mappa ed indicazione delle coordinate cui al para. 2.1.1.

3.3 Pirateria

Nel contesto del Mediterraneo Allargato¹, la pirateria è un fenomeno presente principalmente nel Golfo di Aden, nelle acque prospicienti la Somalia e nel Golfo di Guinea. Le

¹ Mediterraneo Allargato: Al bacino mediterraneo, nel senso strettamente geografico, si uniscono in un unico insieme il il Caucaso, il Mar Nero e l'Asia Centrale, a est, ed il Mar Rosso, il Canale di Suez ed il Golfo Persico, a sud-est. Si tratta di un teatro geopolitico che lega in sé aree contigue non omogenee, di vitale importanza a livello internazionale. E' formato da tre insiemi, quello euro-mediterraneo, il più stabile e maggiormente caratterizzato da fenomeni di cooperazione, quello mediorientale e quello caucasico-caspico, dove si concentrano i principali fattori di crisi.

azioni intraprese sono quelle tipiche dell'abbordaggio con uso delle armi e dirottamento della nave in aree non note.

Di norma i pirati agiscono nelle ore diurne, preferibilmente all'alba e al tramonto, e prendono in ostaggio la nave o l'equipaggio, chiedendo un riscatto per il loro rilascio. Gli obiettivi più colpiti sono le navi da carico (gasiera/metaniere, petroliere, portacontainer, porta rinfuse) e le navi passeggeri. L'attacco viene solitamente eseguito con uno o due natanti che possono raggiungere una velocità massima anche di 30 nodi, delle seguenti tipologie:

- *skiff* (imbarcazioni strette e lunghe tipicamente 12-14m con motore fuoribordo)
- *dinghy* (di lunghezza normalmente inferiore ai 10m)
- lance in vetroresina (di lunghezza 5-8m).

La permanenza in area dei pirati può aumentare sensibilmente, anche fino a 30 giorni, con il supporto di navi d'appoggio, tipicamente i *dhow*, imbarcazioni da pesca locali costruite in legno, di lunghezza tipica 20-25m e dotate di un cassero che occupa tra un terzo e metà dell'imbarcazione. Di solito un *dhow* pirata si riconosce a distanza da segnali inequivocabili: ha almeno un paio di *skiff*/gommoni/lance sul ponte, sei o sette persone a bordo, nessuna bandiera e un telone di plastica steso sulla coperta.

Sulla base di indirizzamenti esterni o del suggerimento del sistema a seguito dell'analisi di un'immagine precedente, un operatore sceglierà in quale punto eseguire l'acquisizione e, secondo le opportunità proposte dal sistema, a che ora e con quale modalità.

Alla ricezione dell'immagine, oltre a quanto riportato nel para. 2.2, il sistema dovrà segnalare un ALERT per:

- le imbarcazioni riconosciute come *dhow* che abbiano issati sul ponte/affiancati/vicini dei natanti di piccole dimensioni;
- le imbarcazioni riconosciute come *dhow* che sembrino costituire il punto di partenza per uno o più natanti di piccole dimensioni che siano diretti verso una nave cargo o passeggeri; in questo caso l'ALERT deve essere segnalato anche per i natanti e la nave;
- le navi cargo o passeggeri che abbiano affiancati/vicini uno o più natanti di piccole dimensioni o che sembrino essere da questi inseguite; in questo caso l'ALERT deve essere segnalato anche per i natanti.

Selezionando una delle imbarcazioni (*dhow*, nave cargo/passeggeri, natante veloce), il sistema dovrà fornire all'operatore le informazioni di cui al para. 2.1.1 per ottenere un'acquisizione centrata sulla posizione futura stimata (al momento della successiva acquisizione) della traccia.

In generale, l'operatore dovrà poter scegliere se:

- eseguire la successiva acquisizione dove suggerito dal sistema per seguire una determinata imbarcazione;
- eseguire la successiva acquisizione secondo le modalità di puntamento sulla mappa ed indicazione delle coordinate cui al para. 2.1.1.

3.4 Controllo flussi migratori

Il controllo delle frontiere, dei flussi migratori ed il traffico degli essere umani sono oggi argomenti quanto mai caldi. Le principali rotte battute dai migranti che collegano l’Africa ed il Medio Oriente all’Italia sono le seguenti:

- dalla Libia occidentale – zona tra Tripoli e Zuara – verso la Sicilia meridionale, Lampedusa, e Malta;
- dalla Libia orientale – zona di Bengasi – verso la Sicilia meridionale;
- dalla Tunisia – zona tra Susa e Sfax – verso la Sicilia meridionale e Lampedusa;
- dalla Tunisia – zona tra Biserta e Capo Bon – verso la Sicilia meridionale e Pantelleria;
- dall’Algeria verso la Sardegna, tipicamente nella provincia di Cagliari;
- dall’Egitto – zona di Alessandria – verso la Sicilia orientale e la Calabria orientale;
- dalla Turchia verso la Calabria orientale.

I migranti sono spesso trasportati su imbarcazioni di fortuna dei tipi e dalle caratteristiche riportati in tabella:

Tipo	Velocità [kn]	Lunghezza [m]	Caratterizzazione
Barca a vela	10-12	15-20	Hanno motore fuoribordo, almeno un albero in alluminio orizzontale e verticale, stralli per la tenuta dell’albero. Nonostante la possibilità di andare a vela, chi le usa per il traffico di esseri umani va a motore.
Gommoni	3-8	8-12	Hanno tubolari gonfiabili in pvc o nylon su 3 lati, sul quarto lato vi è il motore fuoribordo, montato su una placca di legno o metallo.
Barconi	3-8	12-15	Hanno motore entrobordo con locale motore spesso al

			centro o a poppa.
Pescherecci	8-12	18-25	Hanno strutture metalliche alte a poppa, plancia addossata alla prua. Dall'Egitto sono spesso in configurazione "rimorchio", con la rimorchiata a 50-100m di distanza dalla rimorchiante.

Sulla base di indirizzamenti esterni o del suggerimento del sistema a seguito dell'analisi di un'immagine precedente, un operatore sceglierà in quale punto eseguire l'acquisizione e, secondo le opportunità proposte dal sistema, a che ora e con quale modalità.

Alla ricezione dell'immagine, oltre a quanto riportato al para. 2.2, il sistema dovrà segnalare un ALERT per tutte quelle imbarcazioni che, una volta classificate, abbiano caratteristiche in linea con quelle riportate in tabella.

Selezionando una delle imbarcazioni, il sistema dovrà fornire all'operatore le informazioni di cui al para. 2.1.1 per ottenere un'acquisizione centrata sulla posizione futura stimata (al momento della successiva acquisizione) della traccia.

In generale, l'operatore dovrà poter scegliere se:

- eseguire la successiva acquisizione dove suggerito dal sistema per seguire una determinata imbarcazione;
- eseguire la successiva acquisizione secondo le modalità di puntamento sulla mappa ed indicazione delle coordinate cui al para. 2.1.1.

4. STUDIO ORBITALE E VALUTAZIONI DI *TIME PERFORMANCE*

4.1 Obiettivi dello studio e applicativi impiegati

Lo studio è orientato al *design* ed alla valutazione delle prestazioni, sotto il profilo temporale, di una costellazione per la sorveglianza del Mediterraneo Allargato, in considerazione dell'importanza strategica, economica e sociale che tale area ha per l'Italia. L'attività si è concentrata in un primo momento sull'area del Mediterraneo inteso in senso stretto, con particolare focus sulla sua porzione meridionale, dal momento che qui hanno luogo la maggior parte delle attività illegali dell'intero bacino. Successivamente lo studio è stato esteso a tutta l'area del Mediterraneo Allargato.

Il *design* è mirato al conseguimento di un *System Response Time*² tra le 3 e le 5 ore, almeno nel Mediterraneo, in modo da consentire un utilizzo tattico del sistema.

L'attività è stata svolta con il supporto principalmente dell'applicativo "System Tool Kit" (STK). Si tratta di un software per la modellizzazione, la simulazione e l'analisi in quattro dimensioni di oggetti navali, terrestri, aerei e spaziali, dotato di un propagatore di orbite e con capacità di valutazione delle prestazioni. Lo stesso è stato d'ausilio per la creazione degli scenari (costruzione della costellazione, posizionamento delle stazioni di terra, dei *target* fissi, delle imbarcazioni, ecc.) e per le valutazioni di *Revisit Time* e, solo parzialmente, di *System Response Time* (entrambi i termini saranno descritti in seguito). Tuttavia, tale software presenta alcuni limiti, in particolare, per quanto di interesse, relativamente proprio al computo del *System Response Time*. Per ovviare a tale inconveniente è stato appositamente realizzato un programma in MATLAB, la cui validazione mediante confronto con il risultato prodotto da STK è presentata nei paragrafi che seguono.

² *System Response Time* : è il tempo che intercorre tra la sottomissione di una richiesta di acquisizione e l'istante in cui il dato è reso disponibile all'utente.

4.2 Design della costellazione e valutazione del *Revisit Time*

Le esigenze di copertura e le tipologie di sensori radar adatte alla missione hanno dettato il ricorso alle orbite *Low Earth Orbit* (LEO): i satelliti devono infatti volare a quote superiori ai 500km, per limitare per quanto possibile l'effetto del *drag* atmosferico, ma anche inferiori ai 600km, per garantire i rapporti segnale-rumore minimi richiesti dal *Synthetic Aperture Radar* (SAR) di bordo. Sono state scelte orbite circolari al fine di mantenere una quota di volo fissa: ciò consente di disporre di *swath* di dimensioni costanti e di non dover modificare i parametri del SAR in funzione della quota. La necessità di coprire un'area limitata e con latitudine massima inferiore ai 46°N ha permesso di sfruttare in modo efficace le fasce di massima prestazione caratteristiche delle orbite circolari inclinate. Al fine di disporre di un pattern di copertura definito e fisso, sono state scelte orbite ripetitive³.

Prima di descrivere ulteriormente il *design*, occorre definire il *Revisit Time* (RT). Il RT (“tempo di rivisita” in italiano) corrisponde all'intervallo temporale tra due successive possibilità di acquisizione di un'area. Il RT considera la sola fattibilità geometrica dell'acquisizione e fa quindi riferimento al solo ingresso di un bersaglio nell'area di copertura di uno qualsiasi dei satelliti.

Generalmente si parla di *Average Revisit Time* (ART), ovvero la media del RT sull'intero intervallo di osservazione, e di *Max Revisit Time* (MRT), ovvero il massimo RT sperimentato da un bersaglio durante lo stesso intervallo. I due parametri forniscono un'idea di massima circa le prestazioni di una costellazione, ma un'indicazione più precisa è data dalla distribuzione statistica del RT: questa permette infatti di osservare la percentuale dei casi in cui il RT è mantenuto al di sotto di una certa soglia e la frequenza con cui si verificano RT sfavorevoli.

In generale, le orbite circolari inclinate sono caratterizzate da una o più “fasce” di latitudini di massima prestazione in termini di RT in prossimità dei due valori di latitudine pari, in modulo, all'inclinazione dell'orbita. Nel caso specifico del sensore SAR, che manca della capacità di acquisire al *nadir*, le fasce saranno due⁴, una al di sopra ed una al di sotto dei valori di latitudine di cui sopra.

³ Orbite ripetitive: sono orbite in cui, dopo un periodo di ripetizione fisso, il satellite ripassa sulla stessa posizione con riferimento alla superficie terrestre, cosicché il suo percorso si ripete sul *ground track*. Il numero di orbite percorse in un giorno (Q') può essere espresso come $Q' = Q + I/D$, dove D è il numero di giorni del periodo di ripetizione, Q è la parte intera inferiore di Q' e I è un intero primo con D e compreso nell'intervallo $[0, D-1]$.

⁴ Un SAR è caratterizzato da un solo lobo (ipotizzati *incidence angle max* = 70°, *incidence angle min* = 30°), orientato verso la Terra, trasversalmente rispetto alla direzione di avanzamento del satellite, e può essere ruotato in modo da consentire acquisizioni sia *left-* che *right-looking*. Ai fini del calcolo del RT, ciò comporta che si possa considerare un sensore equivalente dotato di due fasci, che puntano verso la Terra, a destra ed a sinistra rispetto alla direzione di volo. Se si considera un'inclinazione i compresa tra 0° e 90° (quindi orbite *prograde*), nell'emisfero Nord saranno allora presenti due fasce di massima prestazione, una a latitudini maggiori di i , dovuta al fascio di sinistra, ed una a latitudini

4.2.1 Costruzione della costellazione

Lo studio è dunque iniziato con la ricerca dell'inclinazione ottima da assegnare all'orbita in modo da far ricadere la fascia di miglior RT inferiore sull'intervallo di latitudini tra la Sicilia e le coste libiche. Le prove hanno suggerito la scelta di un'inclinazione (i) di circa 40.5° .

È stata dunque scelta una famiglia di orbite ripetitive, con quota vicina al centro dell'intervallo indicato al para. 4.2, inclinazione di 40.5° e periodo di ripetizione tale che le tracce a terra di due orbite successive non distino tra loro più dell'estensione dell'area di accesso del sensore, in modo che sia geometricamente possibile coprire a breve distanza di tempo buona parte dell'area già vista durante l'orbita precedente. I parametri sono di seguito riportati:

Q	I	D	Semi-asse [km]	Quota [km]	Inclinazione [°]	Distanza tracce [km]	Area di accesso [km]	Giorni	Ore	Minuti
14	5	6	6920.07	541.93	40.50685	450.2815	602.9082	5	21	22

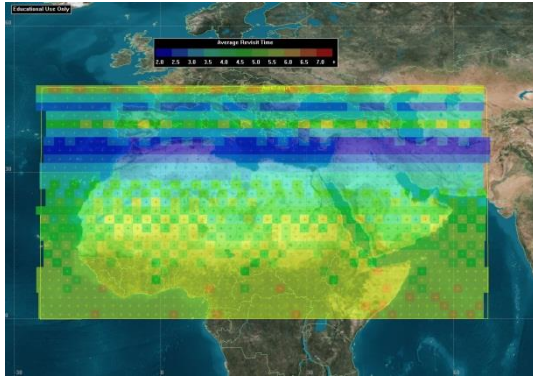
La costellazione è stata costruita mediante estrazione delle orbite da questa famiglia, considerando un argomento del perigeo (ω) pari a 0° e specificando i parametri RAAN e *Mean Anomaly* (M). Il processo è stato iterativo: partendo da un numero minimo di tre *asset*, ad ogni ciclo sono stati aggiunti ulteriori satelliti, è stata modificata la costellazione secondo differenti criteri di simmetria geometrica e sono state valutate e confrontate le *performance* in termini di ART e MRT delle configurazioni ottenute.

Nel caso di tre satelliti sono state valutate due configurazioni:

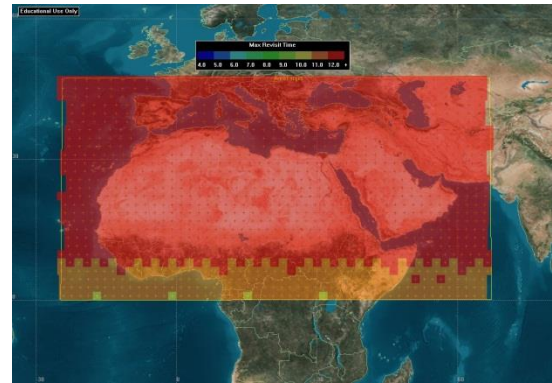
- C.1: Satelliti tutti sulla stessa orbita, equispaziati in M ($M = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ rispettivamente per primo, secondo e terzo satellite all'istante di inizio scenario);
- C.2: Satelliti su tre orbite equispaziate in RAAN ($RAAN = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ rispettivamente per primo, secondo e terzo satellite) e tutti con $M = 0^\circ$ all'istante di inizio scenario.

Le mappe colorimetriche di MRT e ART valutate per entrambe le configurazioni con STK sono di seguito riportate:

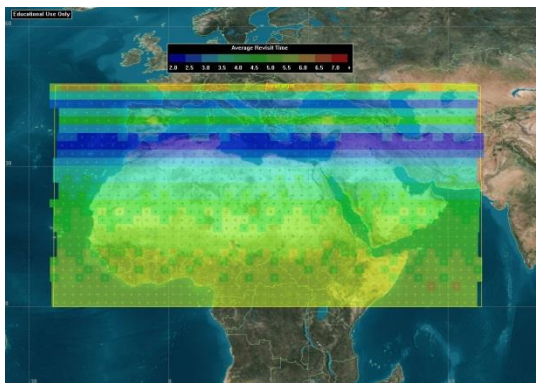
minori, dovuta al fascio di destra. Tuttavia, a differenza della prima, legata alle sole acquisizioni *left-looking*, la seconda consentirà *performance* superiori, dal momento che beneficia di entrambe le geometrie di acquisizione.



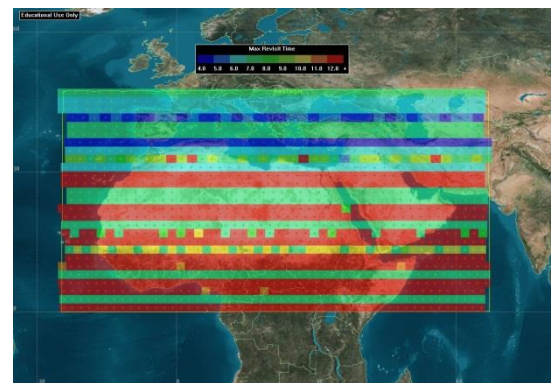
ART C.1



MRT C.1



ART C.2



MRT C.2

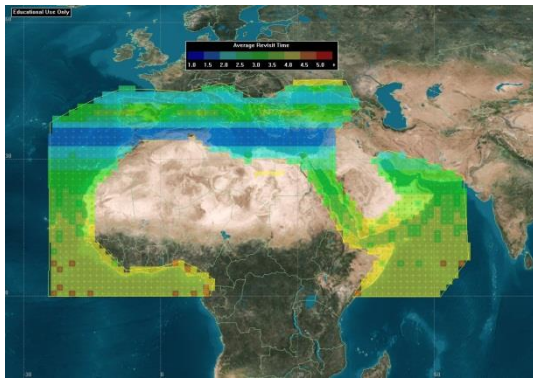
Da un punto di vista di MRT le due configurazioni presentano prestazioni analoghe; lo stesso non può essere detto per il MRT, che nella C.1 è nettamente peggiore. Il risultato della simulazione sembra dunque suggerire la distribuzione dei satelliti su più piani orbitali. I valori di ART e MRT sono comunque troppo elevati per l'applicazione desiderata anche nella C.2: è necessario aumentare il numero di satelliti.

Nel caso di quattro satelliti sono state valutate quattro configurazioni:

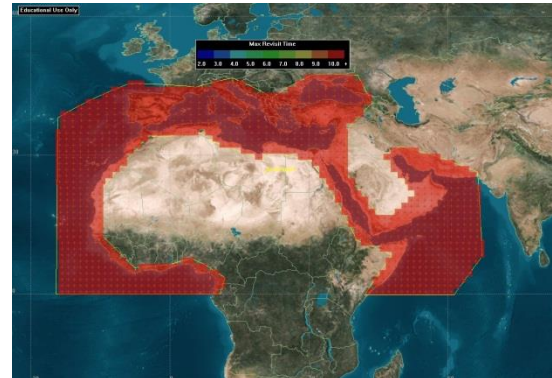
- C.1: Satelliti tutti sulla stessa orbita, equispaziati in M ($M = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ rispettivamente per primo, secondo, terzo e quarto satellite all'istante di inizio scenario);
- C.2: Satelliti su quattro orbite equispaziate in RAAN (RAAN = $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ rispettivamente per primo, secondo, terzo e quarto satellite) e tutti con $M = 0^\circ$ all'istante di inizio scenario.
- C.3: Una coppia di satelliti equispaziati in M ($M = 0^\circ, 180^\circ$ rispettivamente per primo e secondo satellite all'istante di inizio scenario) su un'orbita con RAAN = 0° , più una coppia di satelliti equispaziati in ($M M = 0^\circ, 180^\circ$ rispettivamente per primo e secondo satellite all'istante di inizio scenario) su un'orbita con RAAN = 180° ;

- C.4: Una coppia di satelliti equispaziati in M ($M = 0^\circ, 180^\circ$ rispettivamente per primo e secondo satellite all'istante di inizio scenario) su un'orbita con $RAAN = 0^\circ$, più una coppia di satelliti equispaziati in M ($M = 90^\circ, 270^\circ$ rispettivamente per primo e secondo satellite all'istante di inizio scenario) su un'orbita con $RAAN = 180^\circ$.

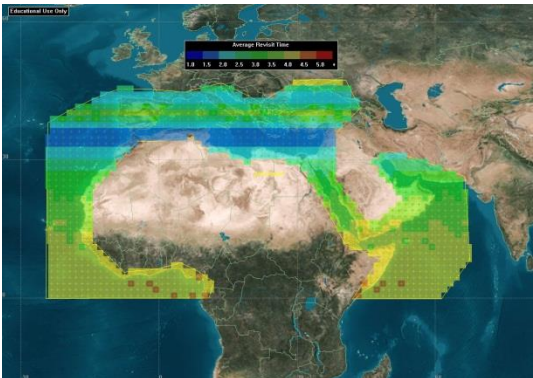
Le mappe colorimetriche di MRT e ART valutate per le quattro configurazioni con STK sono di seguito riportate:



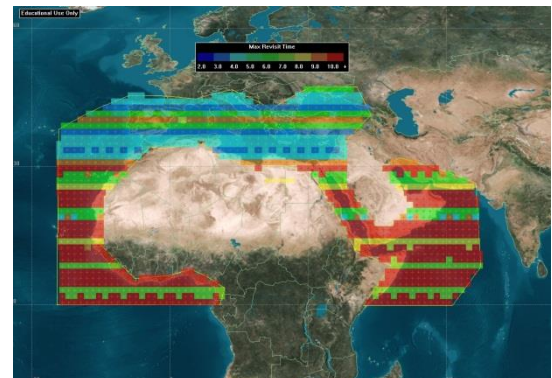
ART C.1



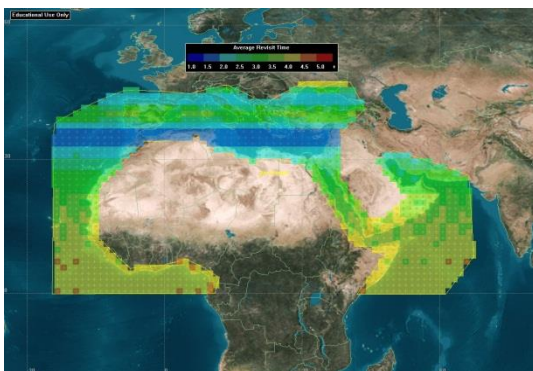
MRT C.1



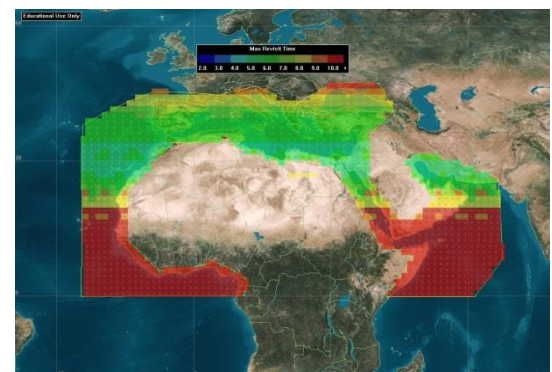
ART C.2



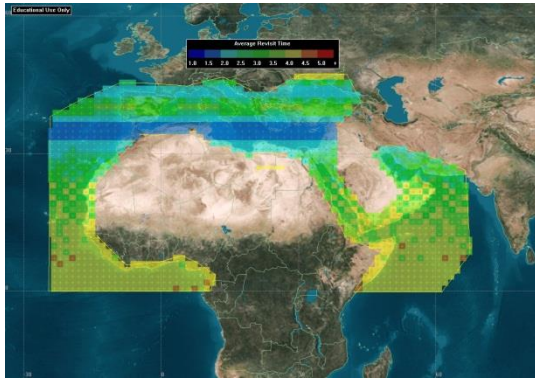
MRT C.2



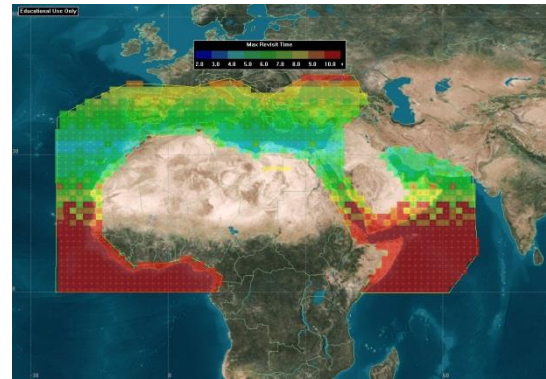
ART C.3



MRT C.3



ART C.4



MRT C.4

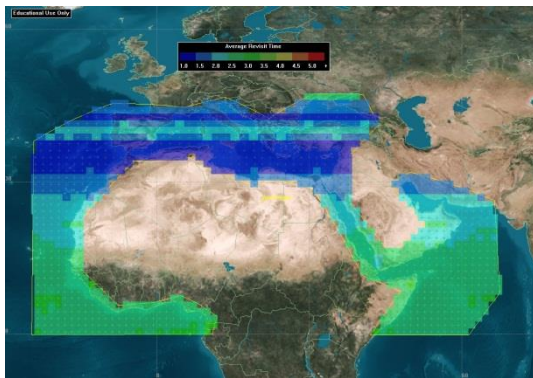
In termini di ART, le quattro configurazioni mostrano risultati analoghi e, ancora una volta, le differenze significative si hanno per i valori di MRT. Analogamente al caso di tre *asset*, la configurazione con tutti i satelliti posti su un unico piano orbitale è quella che restituisce *performance* peggiori: si conferma dunque quanto già ipotizzato. Le C.3 e C.4 mostrano prestazioni simili, con la C.4 leggermente superiore nella fascia del basso Mediterraneo. La C.2 è l'unica che ottiene prestazioni di interesse, ma solo nella fascia di latitudini che comprendono il basso Mediterraneo. Fuori da quest'area le *performance* decadono rapidamente. Dal momento che non sono stati trovati risultati sufficientemente interessanti, viene aumentato ulteriormente il numero dei satelliti.

Il caso di cinque satelliti, caratterizzato da scarse simmetrie, non è stato valutato e si è passati direttamente a sei satelliti, per i quali sono state valutate quattro configurazioni:

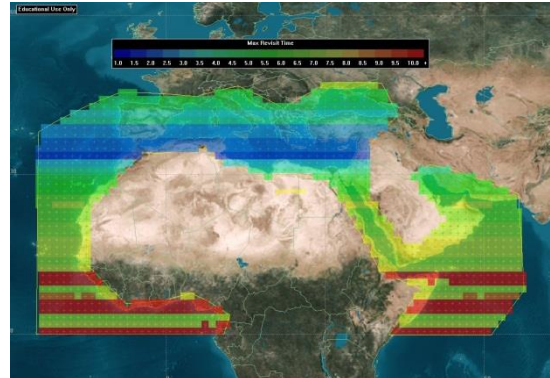
- C.1: Tre orbite equispaziate in RAAN ($RAAN = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ rispettivamente per prima, seconda e terza orbita), ciascuna con due satelliti equispaziati in M ($M = 0^\circ, 180^\circ$ rispettivamente per primo e secondo satellite di ciascuna orbita all'istante di inizio scenario);
- C.2: Tre orbite equispaziate in RAAN ($RAAN = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ rispettivamente per prima, seconda e terza orbita), ciascuna con due satelliti equispaziati in M ($M = 0^\circ, 180^\circ$ per primo e secondo satellite della prima orbita, $M = 120^\circ, 300^\circ$ per primo e secondo satellite della seconda orbita e $M = 240^\circ, 60^\circ$ per primo e secondo satellite della terza orbita, all'istante di inizio scenario);
- C.3: Due orbite equispaziate in RAAN ($RAAN = 0^\circ, 180^\circ$ rispettivamente per prima e seconda orbita), ciascuna con tre satelliti equispaziati in M ($M = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ rispettivamente per primo, secondo e terzo satellite di ciascuna orbita, all'istante di inizio scenario);

- C.4: Due orbite equispaziate in RAAN (RAAN = 0°, 180° rispettivamente per prima e seconda orbita), ciascuna con tre satelliti equispaziati in M (M = 0°, 120°, 240° rispettivamente per primo, secondo e terzo satellite della prima orbita e M = 180°, 300°, 60° rispettivamente per primo, secondo e terzo satellite della seconda orbita, all'istante di inizio scenario).

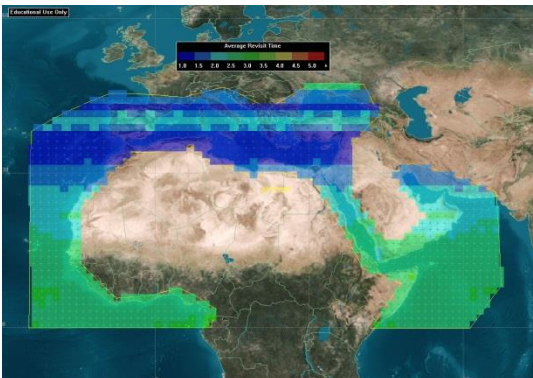
Le mappe colorimetriche di MRT e ART valutate per le quattro configurazioni con STK sono di seguito riportate:



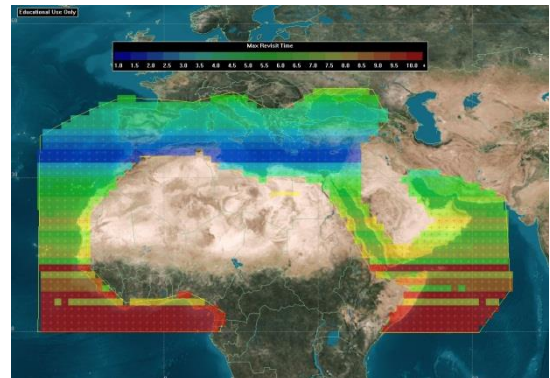
ART C.1



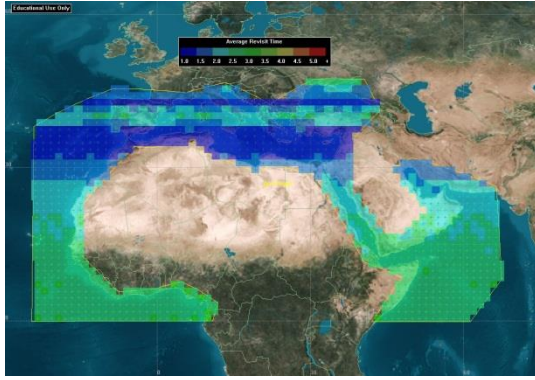
MRT C.1



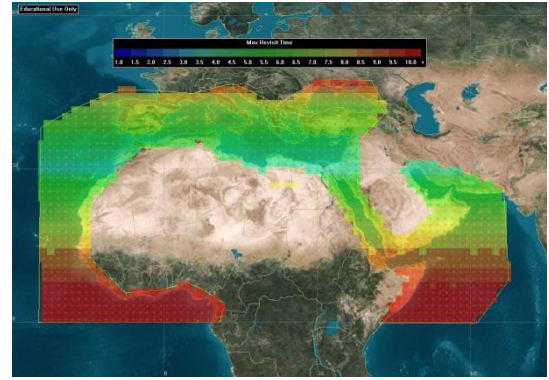
ART C.2



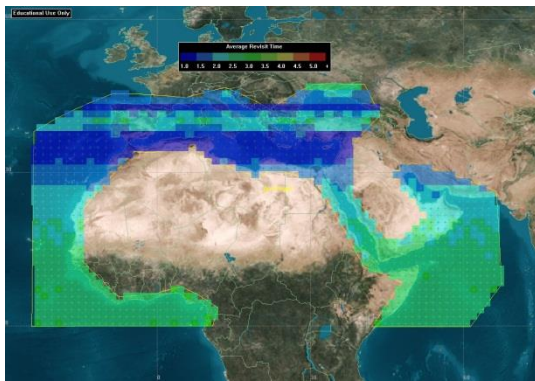
MRT C.2



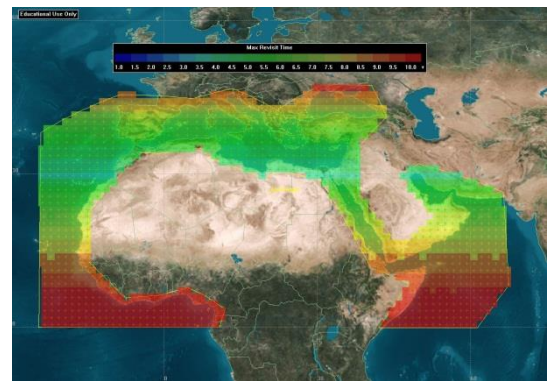
ART C.3



MRT C.3

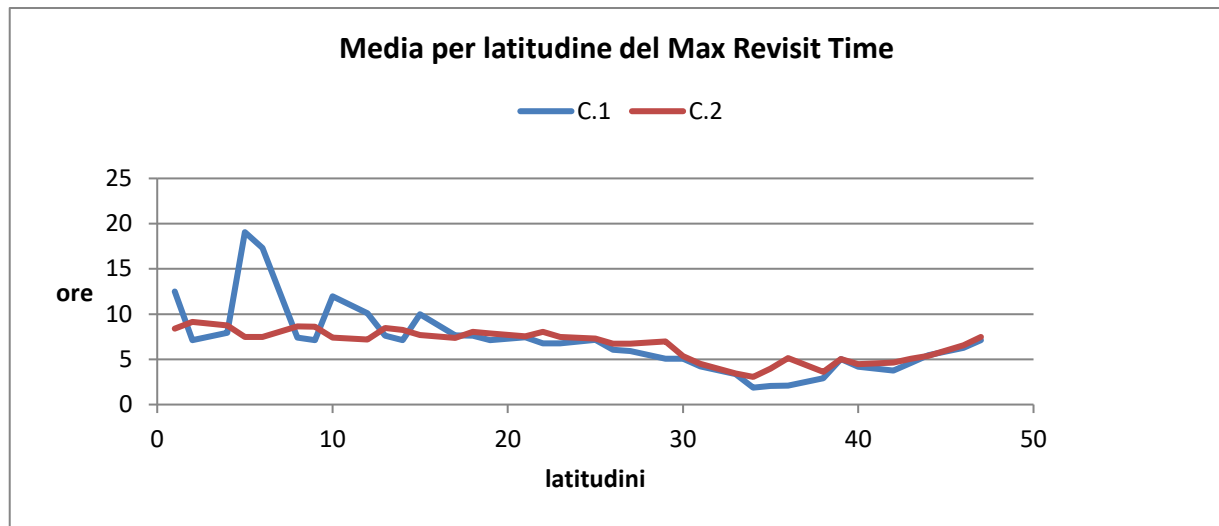


ART C.4



MRT C.4

Ancora una volta, le configurazioni si differenziano soltanto in termini di MRT. La C.3 e la C.4 portano a risultati nettamente inferiori nella fascia mediterranea rispetto alle C.1 e C.2. C.3 e C.4 mostrano infatti una variabilità inferiore del MRT nel senso delle latitudini, mentre C.1 e C.2 concentrano il miglior risultato in una fascia più stretta di latitudini e decadono più rapidamente al di fuori di questa. Il risultato dimostra il vantaggio, a parità di numero di satelliti, di disporre di un piano orbitale in più nel caso in l'area di interesse sia poco estesa nel senso delle latitudini. C.1 e C.2 hanno un comportamento simile in termini di MRT e, pertanto, al fine di comprendere quale delle due abbia prestazioni migliori è stata valutata la media per latitudine del MRT nelle due configurazioni.

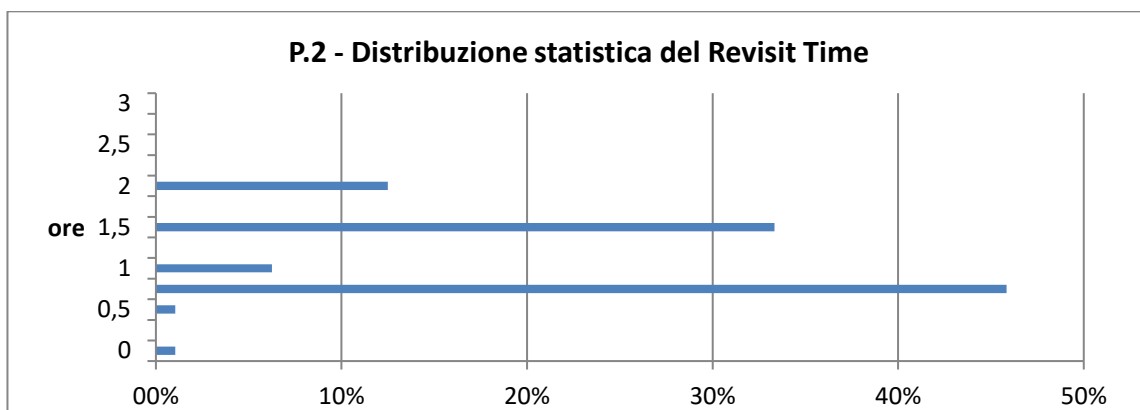
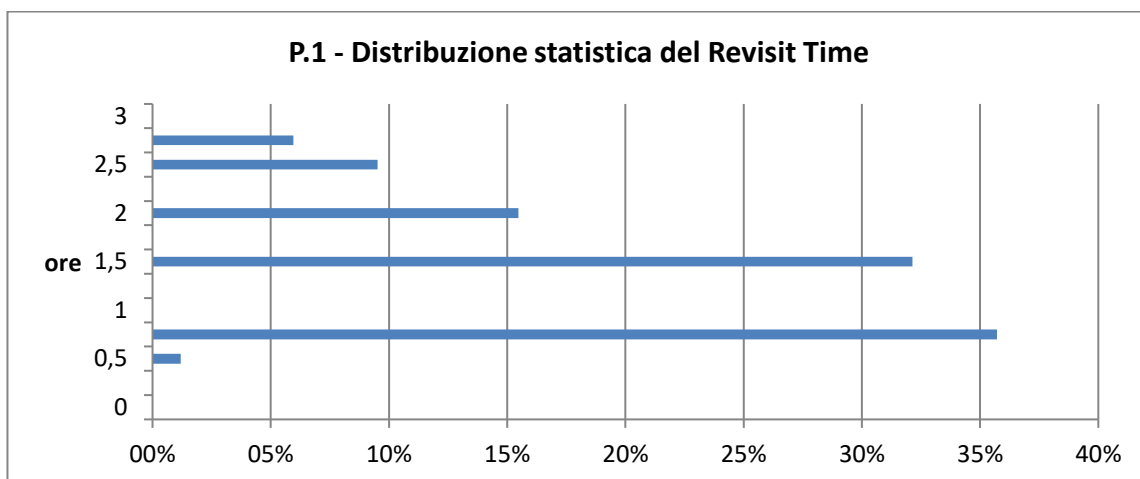
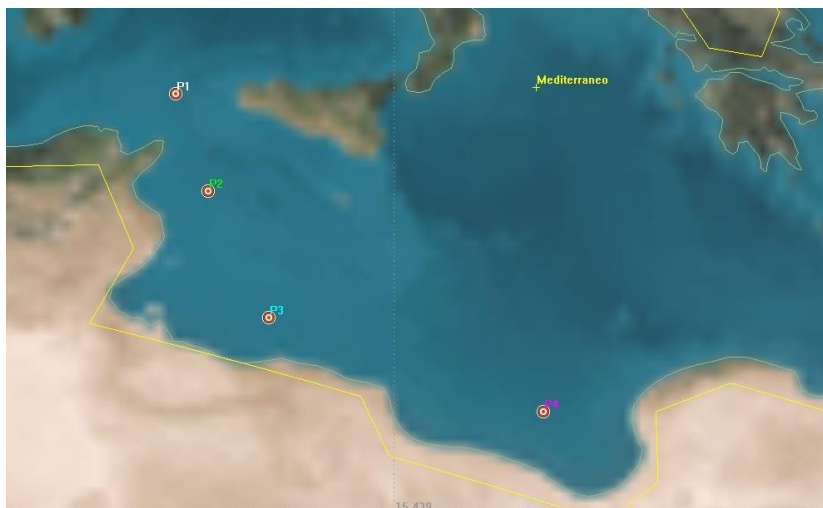


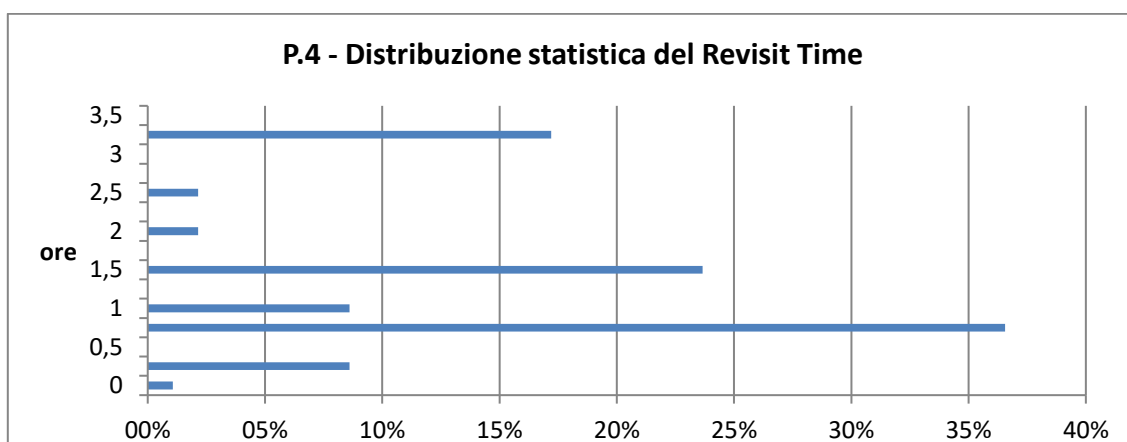
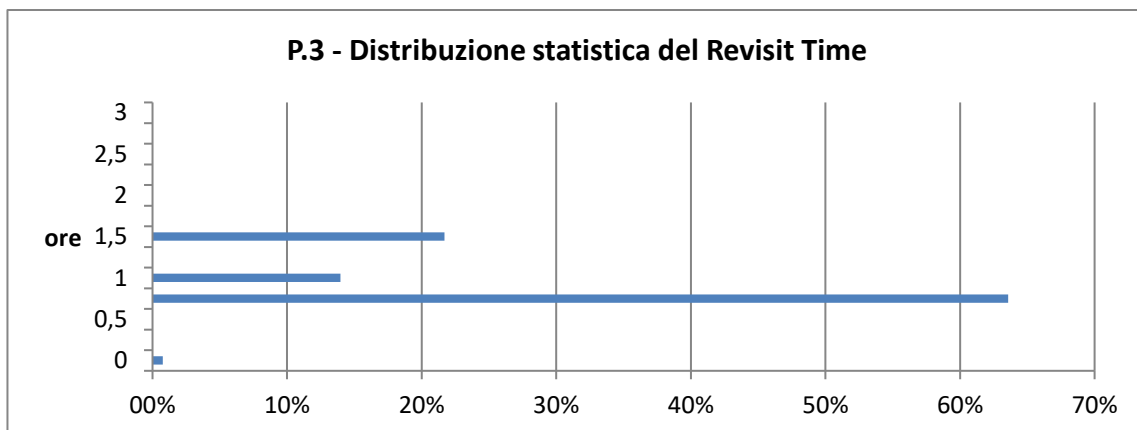
Alle basse latitudini C.1 presenta un comportamento altalenante, mentre C.2 si mantiene pressoché costante, tuttavia dai 18° di latitudine C.1 stabilizza il proprio andamento e raggiunge prestazioni migliori.

I valori ottenuti sono vicini a quelli ricercati per l'applicazione di interesse, ma solo nel basso Mediterraneo. Dunque, per il momento, le analisi saranno concentrate su tale area e si proseguirà considerando C.1. Solo in una fase successiva sarà previsto anche il contributo di ulteriori piani orbitali per estendere la *Maritime Situational Awareness* a tutto il Mediterraneo Allargato.

Come anticipato all'inizio del paragrafo, MRT e ART forniscono solo un'idea di massima circa le prestazioni, mentre un'indicazione più precisa è data dalla distribuzione statistica del RT. Poco senso ha stimare la distribuzione su un'area così estesa come quella in esame, dal momento che punti a latitudini differenti avranno statistiche e, quindi, prestazioni diverse. La statistica è stata dunque valutata puntualmente, facendo riferimento a quattro bersagli posti a diverse latitudini (punti ad uguale latitudine avranno statistiche del RT uguali, pertanto non è necessario ripetere l'analisi per longitudini differenti) all'interno del Mediterraneo, nell'area oggi di maggior interesse:

- P.1. 37.9104°N / 11.2945°E
P.2. 36.0726°N / 11.9215°E
P.3. 33.6727°N / 13.0674°E
P.4. 31.8938°N / 18.2622°E





La statistica del RT mostra come questo sia mantenuto sempre pari o al di sotto delle 2 ore, all'interno della fascia di latitudini tra Malta e le acque antistanti Tripoli. L'area del Golfo della Sirte, con prestazioni di poco inferiori, sperimenta nell'80% dei casi RT inferiori alle 2 ore e solo nel 17% dei casi RT pari al MRT. La fascia di latitudini tra Malta e la Sicilia (isola compresa) mostra un RT pari o inferiore alle 2 ore nell'85% dei casi. Ciò significa che tutta l'area ad oggi maggiormente interessata da flussi migratori, traffici di esseri umani e commerci illegali in mare è visibile dalla costellazione almeno ogni 2 ore nell'85% dei casi. Le stesse prestazioni sono garantite per tutto il Mediterraneo Orientale (all'infuori del Mar Egeo), lo Stretto di Gibilterra, il Mare di Alborán e la porzione di mare antistante le coste tunisine, algerine e marocchine.

Salendo in latitudine, le prestazioni peggiorano (vds nota 4) per il fatto che ci si avvicina molto all'inclinazione dei piani orbitali e che si sta impiegando un sensore SAR. Le condizioni peggiori si trovano vicino alla latitudine 39°N. Al di sopra di tale valore la statistica tornerà a migliorare in una fascia di latitudini di circa 5° per via delle acquisizioni nella sola geometria *left-looking*.

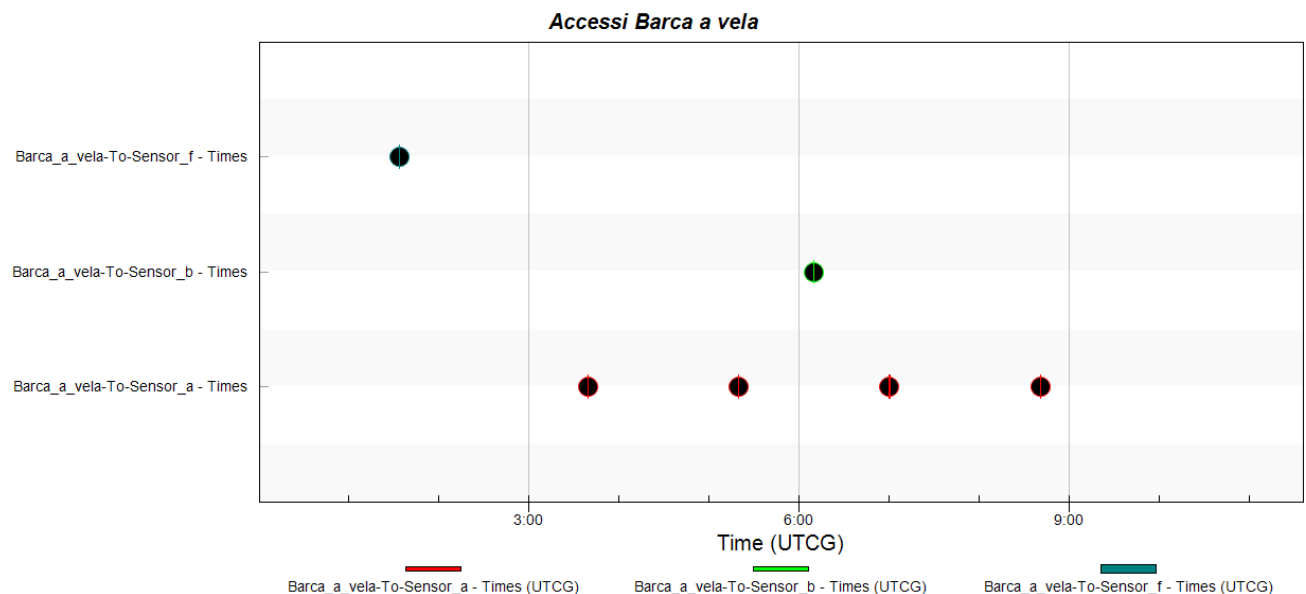
4.2.2 Caso di imbarcazioni impegnate nel traffico di esseri umani nel Mediterraneo

Con particolare attenzione al problema dei flussi migratori, a titolo di esempio, sono stati valutati gli accessi dei sensori a bordo dei satelliti a tre imbarcazioni provenienti dalle coste dell'Africa settentrionale e dirette verso l'Italia, in modo da fornire un'idea dell'osservabilità dei bersagli di maggiore interesse e delle tipologie dei mezzi più diffusi. Tra le rotte maggiormente battute dai trafficanti di esseri umani, sono state selezionate le più brevi, così da porsi nel caso peggiore. In tabella è riportato il dettaglio dei casi studiati:

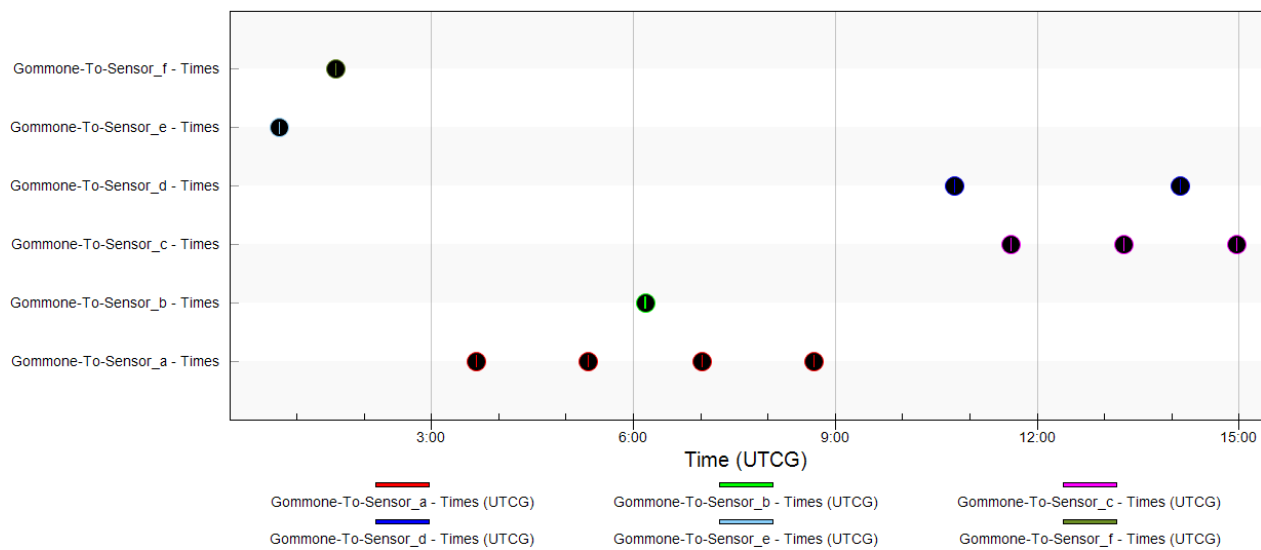
Natante	Origine	Lat. Origine	Long. Origine	Destinazione	Lat. Dest.	Long. Dest.	Vel. [kn]
Barca a vela	Algeria	37.0851°N	7.36462°E	Sardegna	38.8504°N	8.7516°E	10.8
Gommone	Tunisia	37.0386°N	10.8756°E	Sicilia	37.7635°N	12.5505°E	5.9
Peschereccio	Libia	32.7993°N	12.7629°E	Sicilia	37.1224°N	13.9776°E	10.2

Lo stesso scenario è presentato con partenza dei natanti alle 00:00 ed alle 06:00 del giorno di inizio simulazione, per mostrare come il numero degli accessi sia mediamente costante e poco dipendente dalla configurazione iniziale:

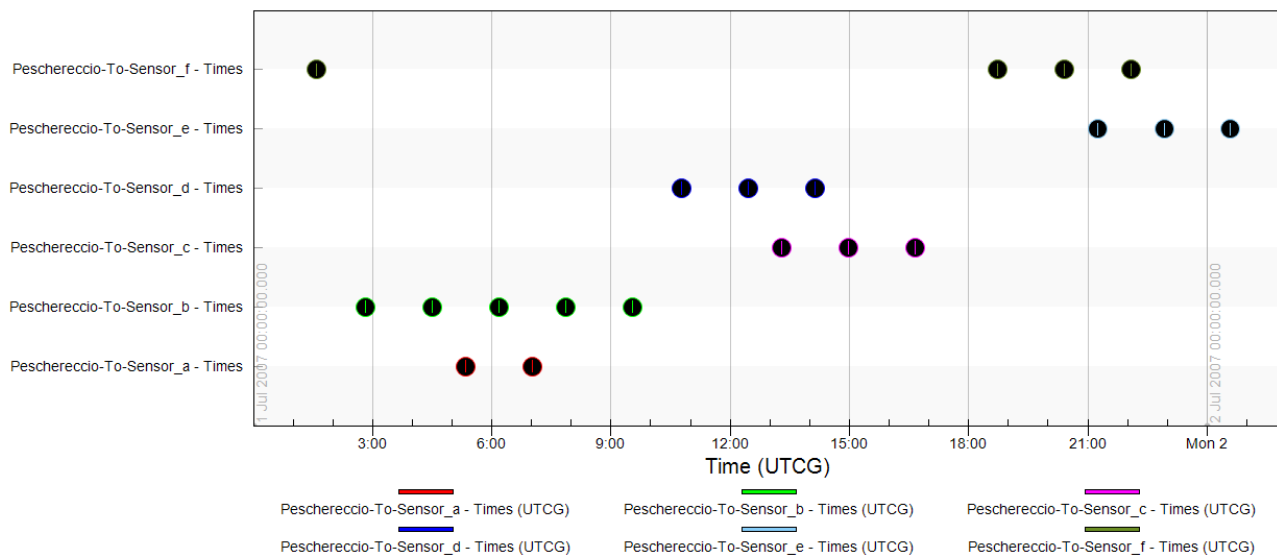
Start time 00:00



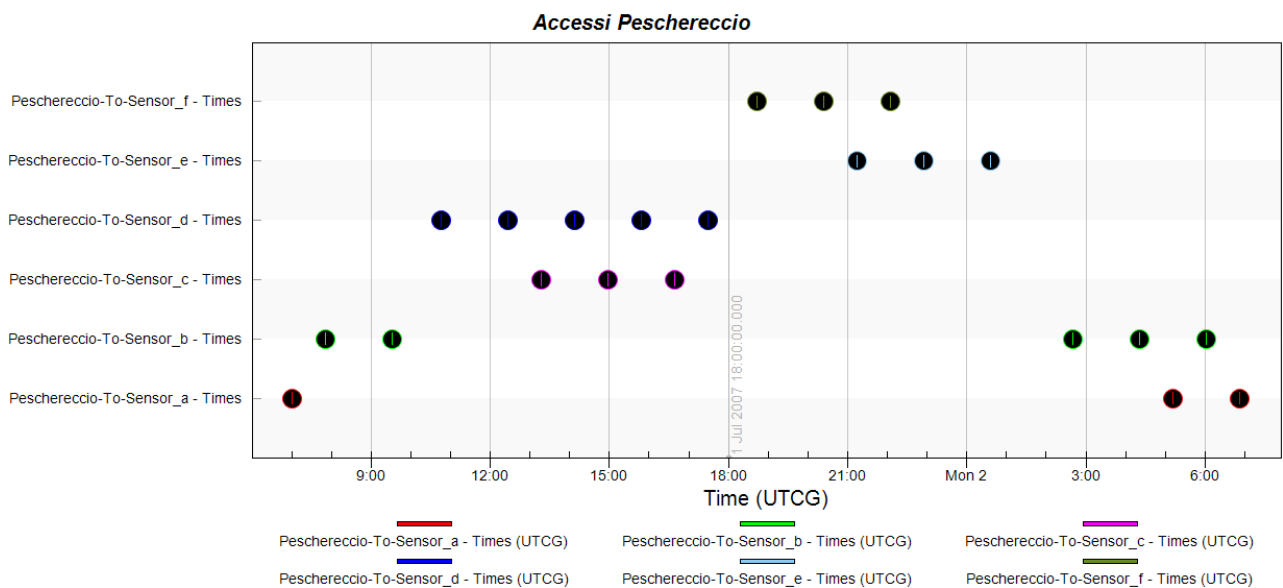
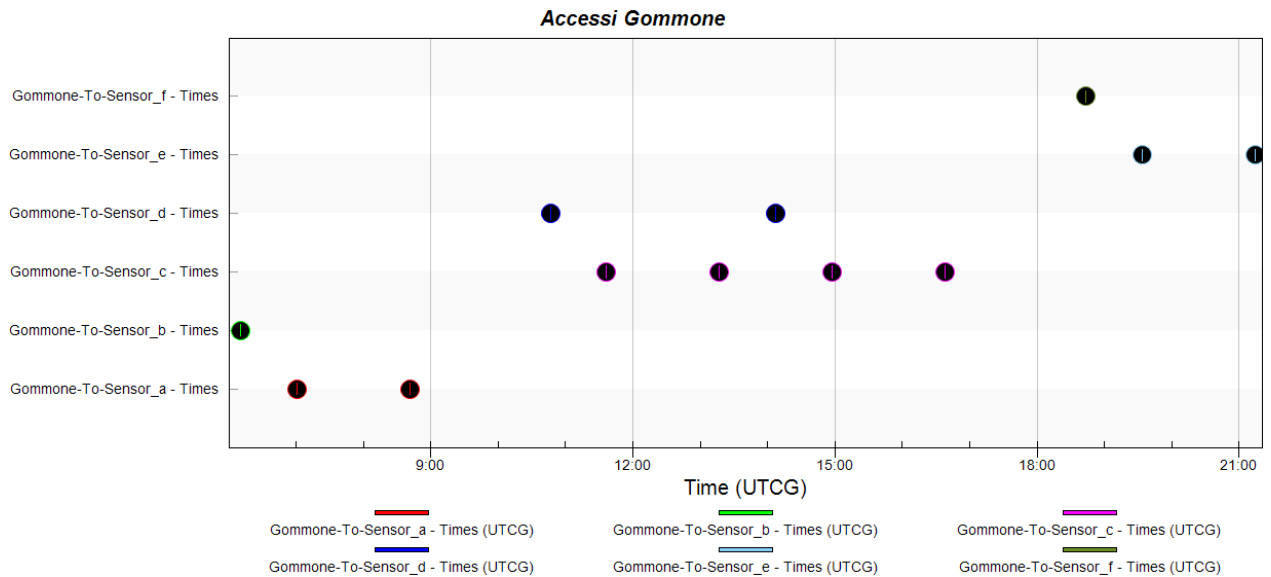
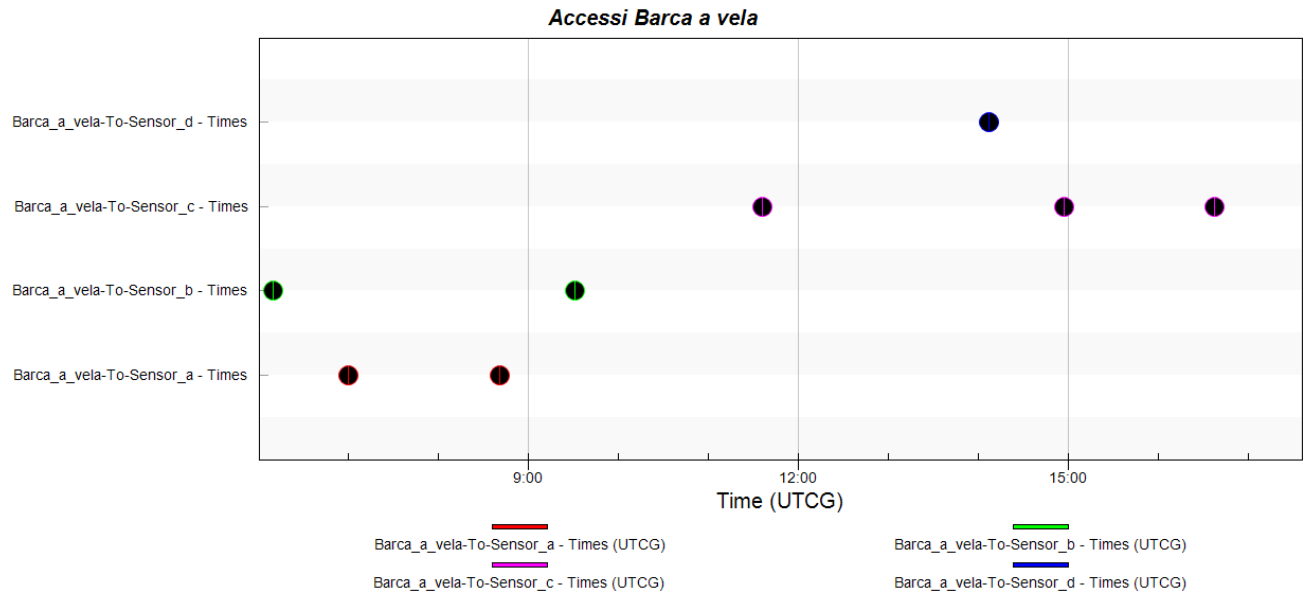
Accessi Gommone



Accessi Peschereccio



Start time 06:00



4.2.3 Completamento della costellazione per la copertura del Mediterraneo Allargato

Il lavoro sinora presentato ha consentito di individuare una configurazione orbitale di sei satelliti che, almeno in termini di RT, riesce a conseguire delle buone prestazioni nel bacino del Mediterraneo, in particolare nella sua porzione meridionale. Lo scenario è stato ulteriormente studiato per valutare il dispiegamento di ulteriori satelliti che possano complementare la costellazione al fine di estendere le prestazioni desiderate a tutto il Mediterraneo Allargato.

In considerazione dell'ampio intervallo di latitudini dell'area in questione, è facile rendersi conto, anche alla luce dei risultati pregressi, che non è possibile individuare un'orbita con un'inclinazione tale da far rientrare all'interno della sua fascia di miglior RT tutta l'area tra il Mar Rosso ed il Golfo di Guinea. Pertanto, supponendo che sia possibile creare una nuova costellazione con satelliti su uno o più piani orbitali, ma tutti alla stessa inclinazione, è stata selezionata una inclinazione con buone performance sulle aree oggi di maggior interesse per la MMI (e.g. costa somala, Golfo di Aden, Mar Arabico). Tra le varie possibilità è stata scelta la famiglia di orbite con parametri:

Q	I	D	Semi-asse [km]	Quota [km]	Inclinazione [°]	Distanza tracce [km]	Area di accesso [km]	Giorni	Ore	Minuti
14	5	6	6909.94	531.8	17.50685	450.2815805	593.6114	5	20	48

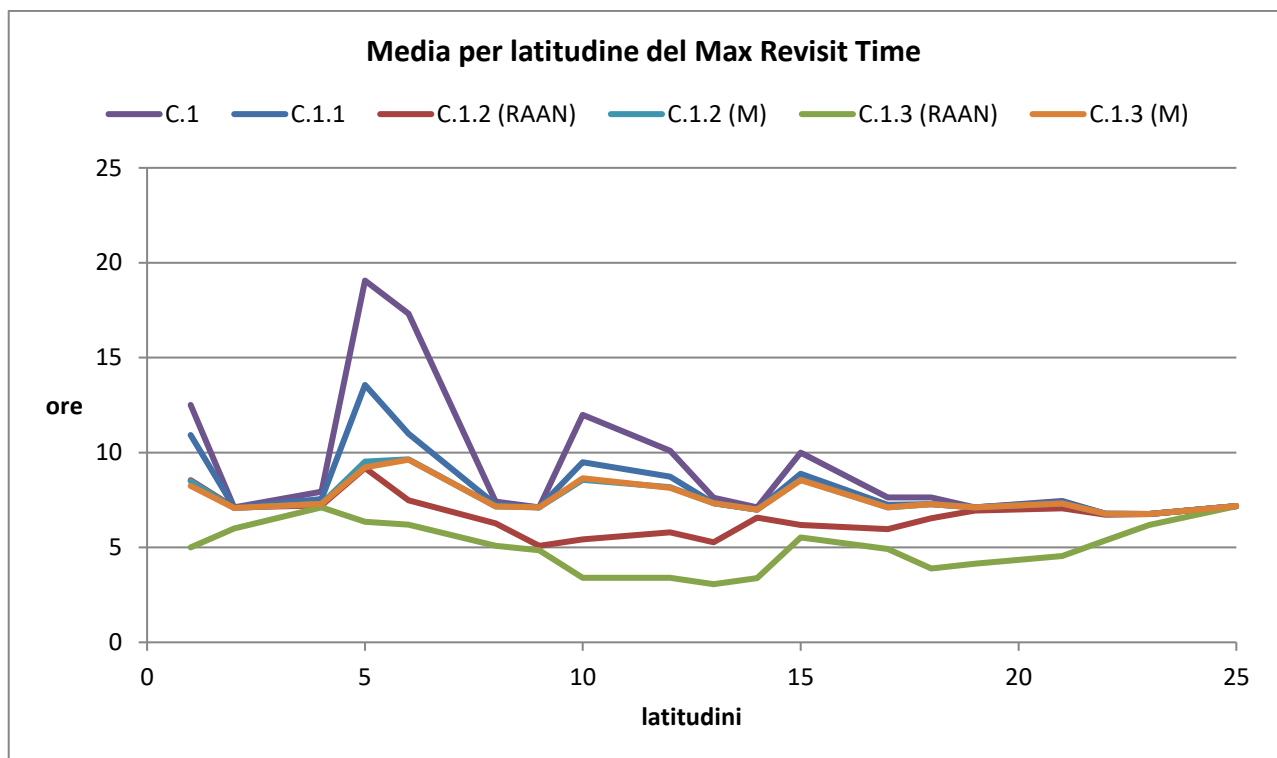
I parametri di ripetitività (Q, I, D) sono identici a quelli delle famiglie orbitali considerate precedentemente. Quota, Area di accesso e durata del ciclo di ripetitività sono leggermente inferiori. Sono stati pertanto valutati i valori di RT nei casi:

- C.1.1 aggiunta alla costellazione C.1 di un satellite;
- C.1.2 (RAAN) aggiunta alla costellazione C.1 di due satelliti equispaziati in RAAN (RAAN = 0°, 180° rispettivamente per primo e secondo satellite), entrambi con $M = 0^\circ$ all'istante di inizio scenario;
- C.1.2 (M) aggiunta alla costellazione C.1 di due satelliti equispaziati in M (M = 0°, 180° rispettivamente per primo e secondo satellite), entrambi con RAAN = 0° all'istante di inizio scenario;

- C.1.3 (RAAN) aggiunta alla costellazione C.1 di tre satelliti equispaziati in RAAN (RAAN = 0° , 120° , 240° rispettivamente per primo, secondo e terzo satellite), tutti con $M = 0^\circ$ all'istante di inizio scenario;
- C.1.3 (M) aggiunta alla costellazione C.1 di tre satelliti equispaziati in M (M = 0° , 120° , 240° rispettivamente per primo, secondo e terzo satellite), tutti con RAAN = 0° all'istante di inizio scenario.

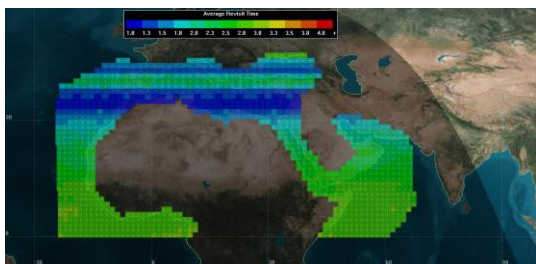
Dal momento che esiste una differenza di inclinazione non trascurabile tra la famiglia di orbite viste in precedenza e quella appena introdotta, si assisterà nel tempo ad uno slittamento reciproco tra i RAAN. Per tale motivo sono state eseguite simulazioni su diversi intervalli temporali, in modo da apprezzare se il fenomeno di slittamento influisce sui valori di RT. Non essendo stati riscontrati effetti di rilievo, viene presentato il risultato delle simulazioni su un solo intervallo temporale.

Al fine di comprendere quali siano i guadagni ottenibili inserendo ulteriori satelliti e quale configurazione abbia prestazioni migliori a parità di numero di satelliti aggiunti, è stata valutata la media per latitudine del MRT nelle differenti configurazioni. Per confronto, viene ripresentato anche il caso C.1.

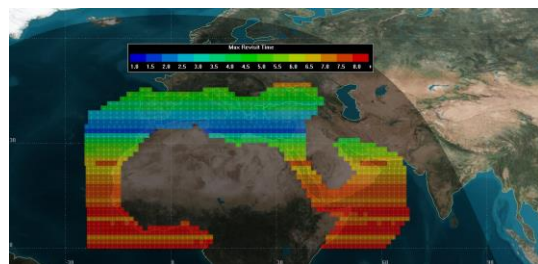


Le prestazioni migliori sono raggiunte da C.1.2 (RAAN) e C.1.3 (RAAN) (con quest'ultima la migliore in assoluto, potendo contare di un satellite in più rispetto alla prima), segno che le configurazioni con satelliti distribuiti su più piani siano da preferirsi. A tali configurazioni ci si riferirà d'ora in poi rispettivamente con C.1.2 e C.1.3, mentre C.1.2 (M) e C.1.3 (M) saranno abbandonate.

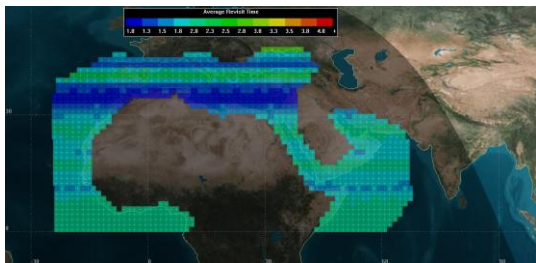
Le mappe colorimetriche di MRT e ART valutate con STK per le configurazioni C.1.1, C.1.2 e C.1.3 sono di seguito riportate. Per rendere più agevole il confronto tra i diversi casi, viene ripresentato anche C.1.



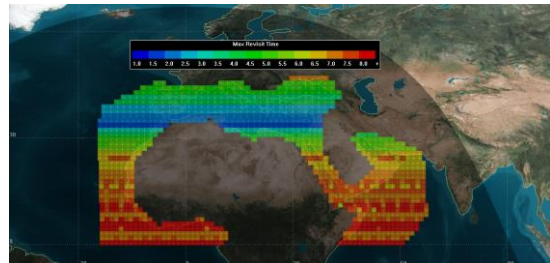
ART C.1



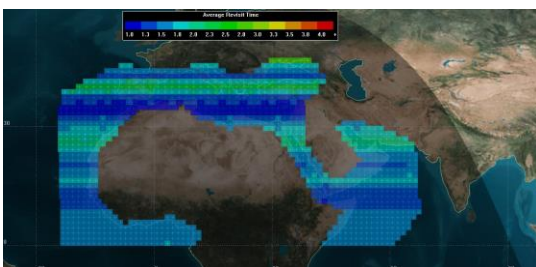
MRT C.1



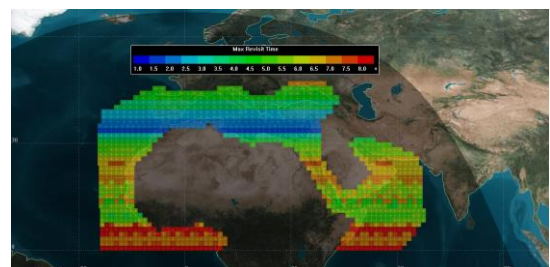
ART C.1.1



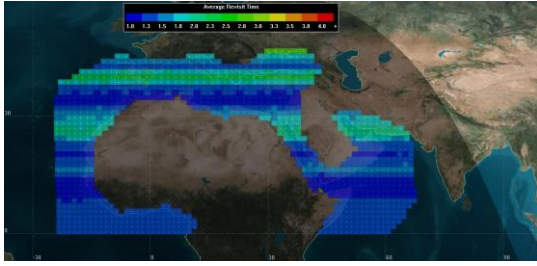
MRT C.1.1



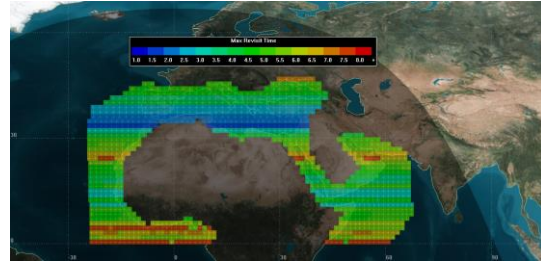
ART C.1.2



MRT C.1.2



ART C.1.3

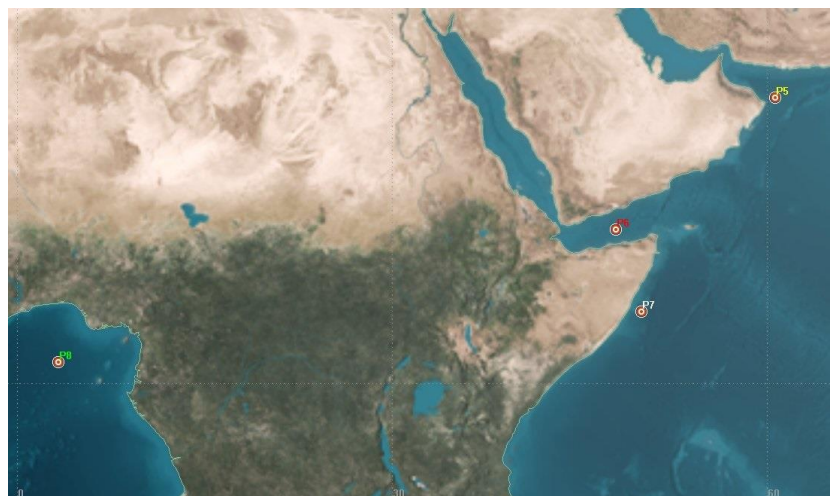


MRT C.1.3

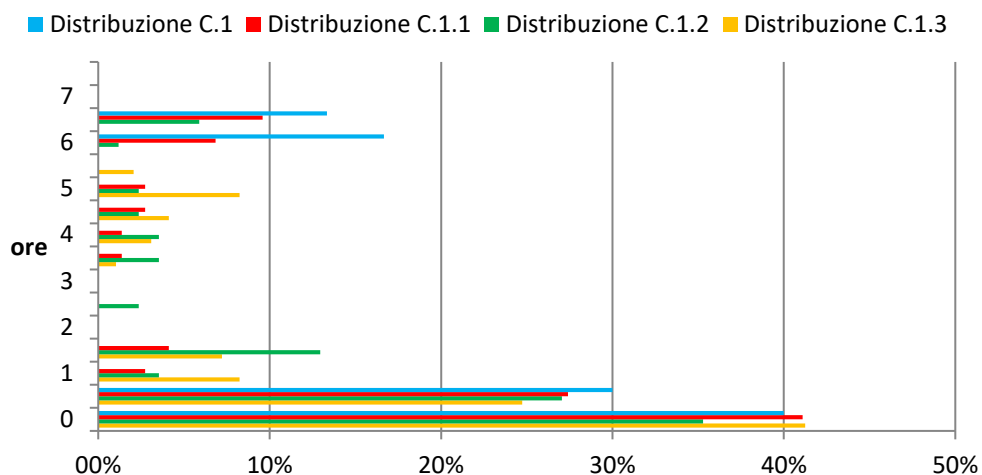
Le immagini mostrano come i satelliti appena inseriti concentrino la fascia di massima prestazione sulle aree del Golfo di Aden e del Corno d’Africa: si passa, infatti, da ART superiori alle 2 ore e mezza e MRT superiori alle 7 ore nel caso C.1 ad ART inferiori ad 1 ora e 15 minuti e MRT inferiori alle 4 ore e mezza nel caso C.1.3. Le prestazioni aumentano comunque fino all’equatore, consentendo miglioramenti anche nel Golfo di Guinea, lungo la costa somala e, per le sole acquisizioni *left-looking*, nel Golfo di Oman. Non è possibile riscontrare un aumento della performance sul Golfo Persico perché non rientra tra le latitudini coperte dai satelliti aggiunti.

In analogia a quanto fatto in precedenza, è stata valutata e viene di seguito mostrata la distribuzione statistica del RT per quattro punti a diverse latitudini, in modo da ottenere un’indicazione su quanto frequentemente si presenta il MRT o valori a questo prossimi. Allo stesso tempo viene mostrato con quale percentuale nei vari casi si ottengono RT inferiori alle 3 ore. Queste informazioni consentiranno di scegliere in modo più consapevole il numero di satelliti eventualmente da aggiungere.

- P.5. 22.8496°N / 60.6595°E
- P.6. 12.2989°N / 47.9207°E
- P.7. 05.7671°N / 49.9528°E
- P.8. 01.7371°N / 03.2766°E



P.5 - Distribuzione statistica del Revisit Time



RT < 3h

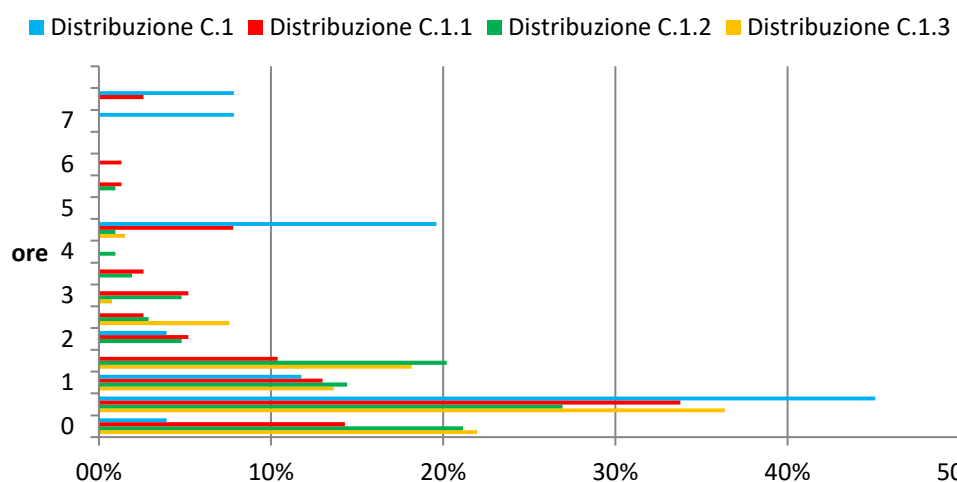
C.1 – 70.0%

C.1.1 – 75.3%

C.1.2 – 81.2%

C.1.3 – 81.4%

P.6 - Distribuzione statistica del Revisit Time



RT < 3h

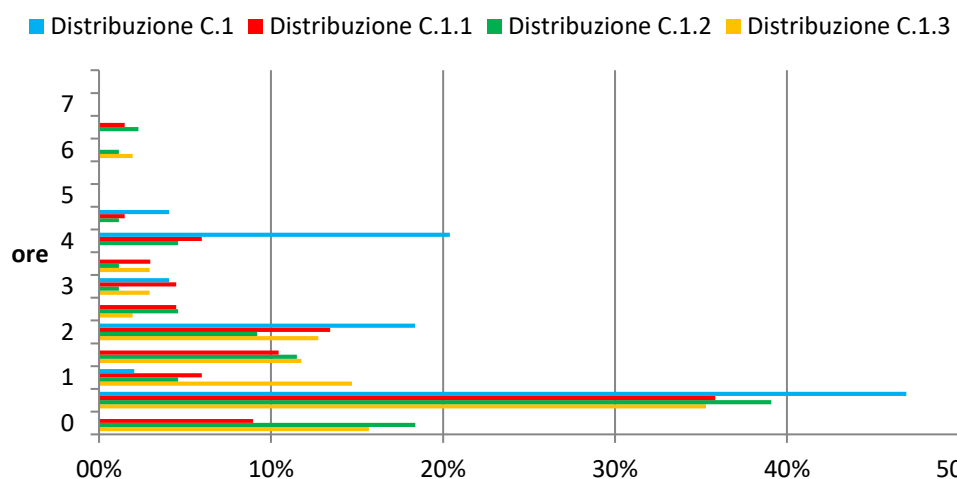
C.1 – 64.7%

C.1.1 – 79.2%

C.1.2 – 90.4%

C.1.3 – 97.7%

P.7 - Distribuzione statistica del Revisit Time



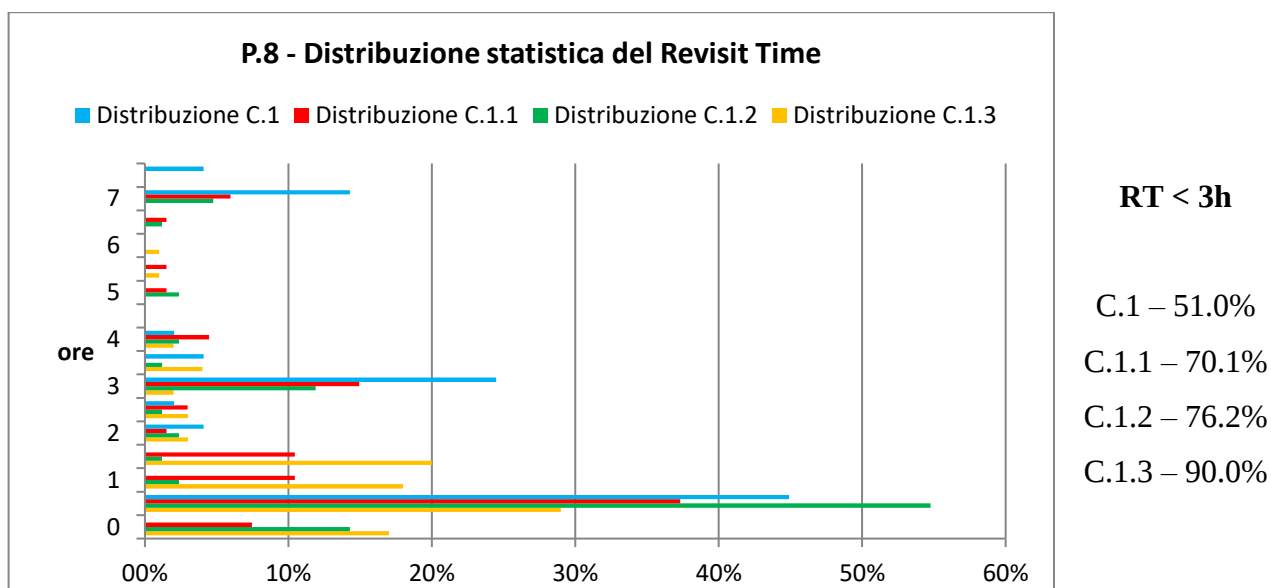
RT < 3h

C.1 – 67.3%

C.1.1 – 79.1%

C.1.2 – 87.4%

C.1.3 – 92.2%



Il miglioramento derivante dall'inclusione di ulteriori satelliti risulta più pronunciato per i punti più vicini alla fascia di massima prestazione dei satelliti introdotti ed è, come intuibile, tanto maggiore quanti più satelliti vengono aggiunti.

Dal momento che è necessario eseguire un *trade-off* tra prestazioni e costi (l'analisi dei quali è fuori lo scopo del presente studio) per la scelta definitiva del numero di satelliti, è stato deciso in sede di tirocinio di portare avanti come caso di studio per le valutazioni di *System Response Time* la configurazione C.1.2. Il caso C.1.3, infatti, sebbene più performante, potrebbe non essere vantaggioso da un punto di vista di rapporto costi-benefici: è infatti richiesto un ulteriore satellite per avere prestazioni non significativamente superiori al caso C.1.2 (si osservino i valori di percentuale relativi ai RT inferiori alle 3 ore riportati affianco a ciascun grafico).

4.3 *System Response Time*

4.3.1 Considerazioni di progetto

Se il RT è indice della frequenza con cui la costellazione rivede i *target*, il *System Response Time* (SRT) misura la capacità del sistema di rispondere con il dato desiderato alle richieste degli utenti. Per SRT si intende infatti il tempo che intercorre tra la sottomissione di una richiesta di

acquisizione e l'istante in cui il dato è reso disponibile all'utente. Nello specifico la sequenza degli eventi è:

- il sistema riceve una richiesta di acquisizione;
- il telecomando viene elaborato;
- il telecomando viene inviato al satellite incaricato di eseguire l'acquisizione;
- il satellite si predispone per eseguire l'acquisizione;
- il satellite acquisisce il dato;
- il satellite si predispone per trasmettere a terra il dato;
- il satellite esegue il *down-link* del dato;
- il dato processato è reso disponibile all'utente.

Il computo esatto del SRT richiede la conoscenza di un certo numero di informazioni, tra cui il numero e la posizione delle stazioni per l'*up-link* dei telecomandi, il numero e la posizione delle stazioni per il *down-link*, il *data rate* di *up-link* dei telecomandi, il *data rate* di acquisizione, il *data rate* di trasferimento a terra dei dati, il tempo necessario al satellite per il cambio di assetto richiesto per eseguire l'acquisizione, il tempo necessario al satellite per il cambio di assetto richiesto per eseguire il *down-link* dei dati, la massima durata di una acquisizione, ecc. Questa lista, lungi dal voler risultare esaustiva, ha il solo scopo di mostrare le difficoltà che si nascondono dietro alla valutazione del SRT.

Data la fase di studio preliminare cui il presente elaborato fa riferimento, in assenza delle informazioni sopra riportate, il computo del SRT si regge su assunzioni e considerazioni derivanti principalmente dall'esperienza maturata da Thales Alenia Space nel settore:

IP1. È stato ipotizzato che l'*up-link* dei telecomandi verso la costellazione sia eseguito mediante un rilancio da satellite geostazionario (GEO), simulando il ricorso ad un *Data Relay System* (DRS). Tale scelta permette di aumentare considerevolmente il tempo disponibile per la trasmissione dei comandi ai veicoli spaziali, dal momento che questi ultimi rimangono in visibilità di un satellite GEO per circa metà del periodo orbitale.

L'ipotesi non è futuristica, in quanto già da tempo la NASA ha realizzato il *Tracking and Data Relay Satellite System*, oggi alla 3° generazione, con cui sono assicurate comunicazioni quasi costanti con la Stazione Spaziale Internazionale e con il telescopio spaziale Hubble, e l'ESA sta sviluppando l'*European Data Relay System*, il cui progetto attuale prevede il lancio nel 2020 di due satelliti GEO.

Un DRS ha la capacità di memorizzare i telecomandi provenienti dalle stazioni di terra e trasmetterli agli asset non appena questi siano in visibilità. Nel caso non si disponga di un vero DRS, ma più semplicemente di un satellite GEO per telecomunicazioni, potrebbe non

essere possibile memorizzare il comando e trasmetterlo dopo un certo ritardo, ma solo ritrasmettere istantaneamente quanto ricevuto. La stazione di terra dovrebbe allora inviare il comando al satellite GEO solo quando il satellite LEO destinatario si trova o sta per entrare nel campo di vista del satellite GEO.

Lo scenario è stato dunque popolato con un satellite GEO posizionato a 11.8°E e dotato di un'antenna per la comunicazione con i satelliti LEO con area di copertura mostrata in figura.



Area di copertura del satellite GEO

Il *footprint* ed il posizionamento sono simili a quelli di Sicral 1B, in modo da valutare performance vicine a quelle che si otterrebbero sfruttando quest'ultimo per il *relay* dei telecomandi.

- IP2. È stato ipotizzato l'utilizzo di due *ground station* per il trasferimento verso il satellite GEO dei comandi per gli *asset* LEO e per il *down-link* dei dati acquisiti. Le due stazioni sono state posizionate in corrispondenza di due infrastrutture esistenti e di proprietà dell'Agenzia Spaziale Italiana, in modo da rendere lo studio realistico e considerare il riuso di investimenti pregressi. Nello specifico, per i satelliti che coprono il Mediterraneo è stato considerato il Centro Spaziale Giuseppe Colombo di Matera, mentre per quelli dedicati alle latitudini inferiori il Centro Spaziale Luigi Broglio di Malindi.
- IP3. È stato considerato un tempo di preparazione del piano di acquisizioni a partire dalla sottomissione delle richieste di 1 ora.
- IP4. Il tempo di trasmissione del telecomando è stato ipotizzato trascurabile. La normale dimensione di un comando è dell'ordine dei 200Kbit. Per tale valore, considerando una comunicazione stazione-GEO e GEO-LEO in UHF, con canalizzazione 25KHz e modulazione BPSK, la durata della trasmissione del comando è di soli 8 secondi per tratta.

- IP5. È stato ipotizzato che i satelliti necessitino di un “*pre-collection time*” successivamente alla ricezione del telecomando per cambiare l’assetto e predisporre per l’acquisizione. Il valore è stato scelto mediante confronto con i satelliti del sistema COSMO-SkyMed di 2° generazione in corso di sviluppo. Questi ultimi richiedono, nel caso migliore, 3 minuti per eseguire il cambio di assetto, ma hanno dimensioni ben maggiori di quelle che avrebbero i satelliti per sorveglianza marittima sotto analisi. Pertanto, è stato valutato ragionevole e conservativo per il caso in esame un *pre-collection time* medio di 3 minuti.
- IP6. Analogamente al punto precedente, è stato considerato un “*post-collection time*” di 3 minuti per consentire al satellite di eseguire il cambio d’assetto e predisporre per il *down-link* dei dati e la ricezione di nuovi comandi.
- IP7. È stato considerato un tempo medio di acquisizione di 2 minuti, corrispondente ad una strisciata lunga 800km. Tale valore è idoneo se confrontato con l’ampiezza del bacino del Mediterraneo (3700km circa) e se si considera che solo in pochi casi l’intera area è sorvolata da un satellite.
- IP8. Come *data rate* di acquisizione e *down-link* dei dati sono stati considerati i valori tipici di sistemi satellitari dotati di sensore SAR attualmente in corso di sviluppo, rispettivamente 2.500Mbps e 1.000Mbps. Tali valori, insieme alla durata media di acquisizione, portano ad un tempo medio di *down-link* di 5 minuti.
- IP9. È stata considerata la possibilità di suddividere il *down-link* dei dati su più passaggi per le stazioni di terra, poiché alcuni contatti hanno durata inferiore al tempo di *down-link* impostato.

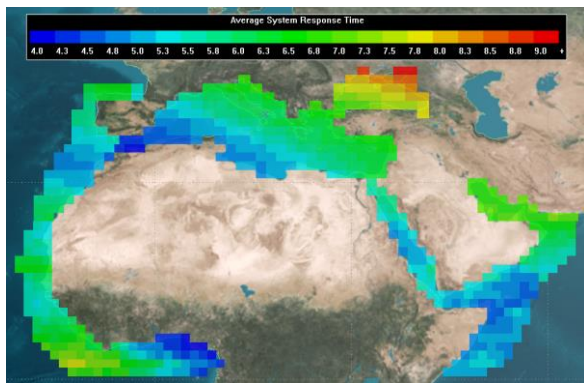
4.3.2 Sviluppo di un programma in MATLAB per l’analisi del *System Response Time*

STK offre la possibilità di eseguire la valutazione del SRT, tuttavia non è possibile prendere in considerazione tutte le ipotesi di cui al paragrafo precedente. Nello specifico, sono state riscontrate limitazioni nel *tool* per quanto riguarda:

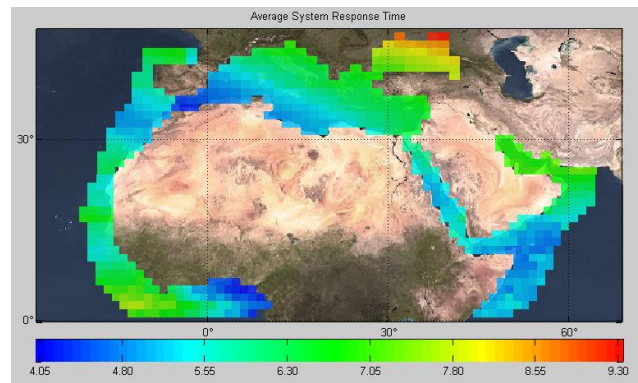
- utilizzo di più di una *ground station*;
- *down-link* dei dati frazionato;
- impostazione di una durata di acquisizione non nulla.

È stato pertanto scritto un programma in MATLAB che permette di valutare e plottare il SRT e la sua distribuzione statistica, sulla base dei dati di accesso ad area di interesse, satelliti e *ground station* calcolati ed esportati da STK. Per verificare la correttezza del programma, lo stesso ha subito un processo di validazione.

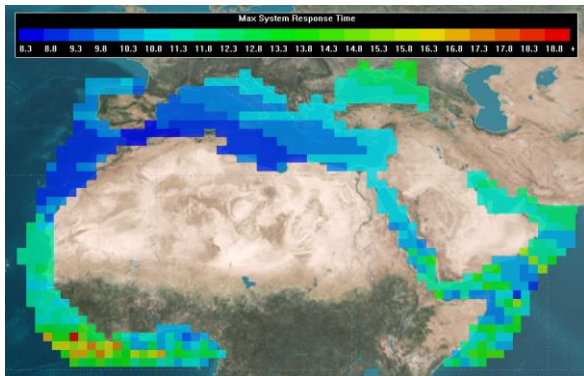
Il primo passo è stato confrontare i risultati del programma con quelli di STK nella configurazione con le ipotesi di cui al paragrafo precedente gestibili da STK e impostando sul programma l'utilizzo della sola stazione di Malindi, il *down-link* non frazionato e la durata dell'acquisizione pari a 0 minuti. Sono state pertanto verificate le corrispondenze tra gli andamenti nel tempo del SRT per più punti dell'area e tra le mappe colorimetriche di *Max* SRT (MSRT) e *Average* SRT (ASRT). Di seguito vengono riportati i risultati, con il confronto tra gli andamenti per un solo punto.



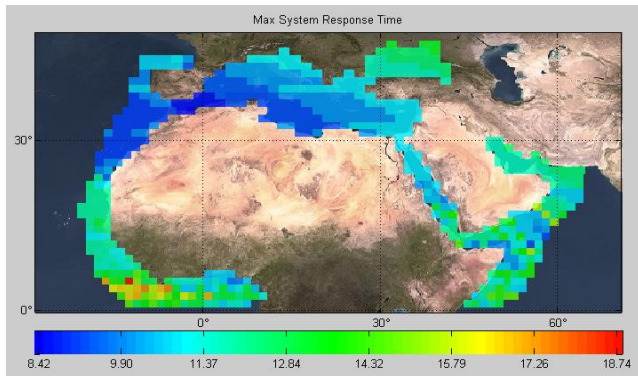
ASRT calcolato con STK



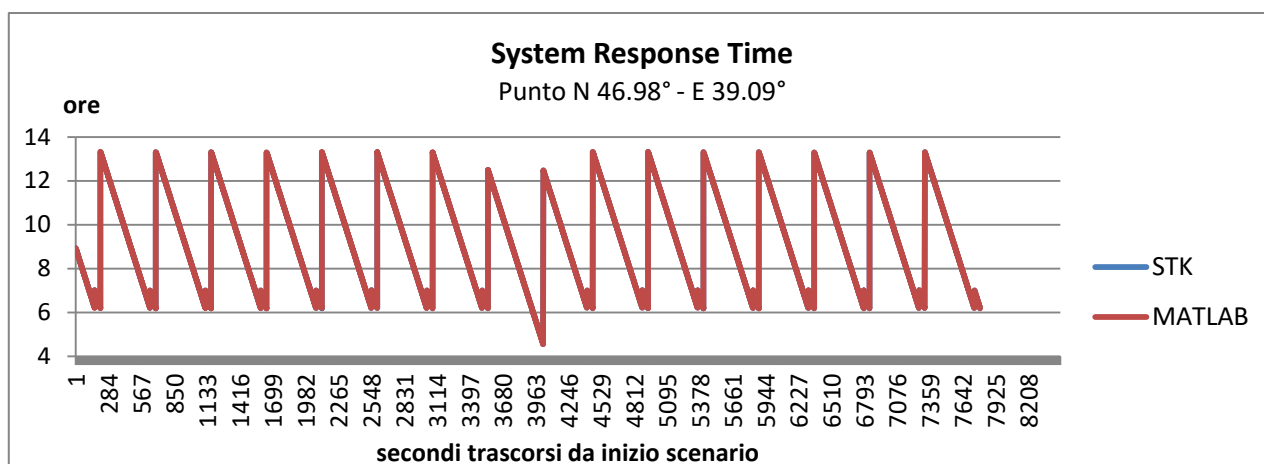
ASRT calcolato con MATLAB



MSRT calcolato con STK



MSRT calcolato con MATLAB



Il confronto tra le mappe, seppur qualitativo, mostra come la distribuzione dei valori calcolati con MATLAB sia equivalente a quanto restituito da STK. Gli andamenti del SRT per il punto N 46.98° E 39.09° calcolato nei due casi sono infine perfettamente sovrapposti.

Il secondo passo è stato verificare la correttezza del metodo di frazionamento del *down-link* dei dati. A tale scopo si è scelta una configurazione semplice, riducendo la costellazione ad un solo satellite, prevedendo come unica stazione di terra Malindi ed impostando:

- tempo di preparazione del piano di missione = 0 minuti;
- *pre-collection time* = 0 minuti;
- *post-collection time* = 0 minuti;
- durata acquisizione = 0 minuti;
- durata *down-link* dei dati = 8 minuti.

Per un punto dell'area è stato confrontato l'andamento del SRT valutato con MATLAB nei casi di frazionamento e non frazionamento del *down-link*. Le ragioni delle differenze tra i due andamenti sono state fornite dall'analisi puntuale dei dati di accesso al punto ed alla stazione di terra.

Viene di seguito riportato il grafico della differenza tra i due andamenti, insieme alla tabella che sintetizza le ragioni delle differenze.

Accessi al punto ed alla stazione di terra				
Accessi	Data	Istante inizio accesso	Istante fine accesso	Durata accesso
1° accesso al punto	01/07/2007	00:11:55	//	//
1° accesso a Malindi	01/07/2007	08:50:52	08:56:59	00:06:07
2° accesso a Malindi	01/07/2007	10:29:09	10:39:20	00:10:11
2° accesso al punto	01/07/2007	12:06:47	//	//

3° accesso a Malindi	01/07/2007	12:13:18	12:16:15	00:02:57
4° accesso a Malindi	01/07/2007	20:43:35	20:52:32	00:08:57
3° accesso al punto	02/07/2007	00:02:24	//	//
6° accesso a Malindi	02/07/2007	08:40:33	08:48:18	00:07:45
7° accesso a Malindi	02/07/2007	10:19:45	10:29:41	00:09:56
6° accesso al punto	04/07/2007	11:38:10	//	//
16° accesso a Malindi	04/07/2007	18:36:58	18:41:02	00:04:04
17° accesso a Malindi	04/07/2007	20:14:24	20:24:36	00:10:12
8° accesso al punto	06/07/2007	09:38:50	//	//
26° accesso a Malindi	06/07/2007	09:43:46	09:49:42	00:05:56
27° accesso a Malindi	06/07/2007	18:16:07	18:24:03	00:07:56
28° accesso a Malindi	06/07/2007	19:55:28	20:05:22	00:09:54

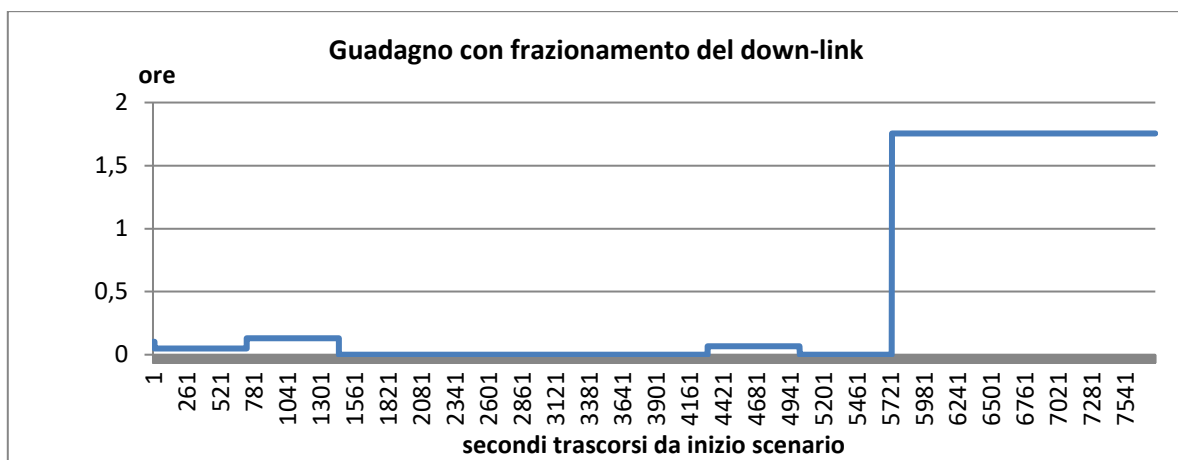


Grafico e tabella mostrano insieme come, per il 1°, 2°, 3°, 6°, 8° accesso al punto, il *down-link* dei dati si concluda prima nel caso di frazionamento del *down-link* abilitato.

Per 1°, 2°, 3° e 6° accesso al punto avviene infatti che il primo accesso disponibile alla stazione di terra (rispettivamente 1°, 3°, 6°, 16°) ha durata troppo breve per eseguire, nel caso di non frazionamento, il *down-link* del dato; tale possibilità si ha solo all'accesso seguente (rispettivamente 2°, 4°, 7, 17°) ed il *down-link* si concluderà 8 minuti dopo l'istante di inizio di quest'ultimo accesso. Nel caso di frazionamento, invece, il *down-link* può comunque iniziare durante il primo accesso alla stazione di terra e viene concluso durante il secondo accesso. Pertanto il SRT si riduce, correttamente, di un valore pari alla durata del primo accesso alla stazione.

Se per gli accessi al punto appena descritti il guadagno è solo di pochi minuti, differente è il caso dell'8° accesso. Qui, infatti, ciascuno dei due accessi successivi alla stazione di terra (26° e 27°) ha durata inferiore agli 8 minuti, ma la somma delle loro durate supera tale valore: in caso di frazionamento il *down-link* può essere eseguito in queste due finestre, mentre in caso di non

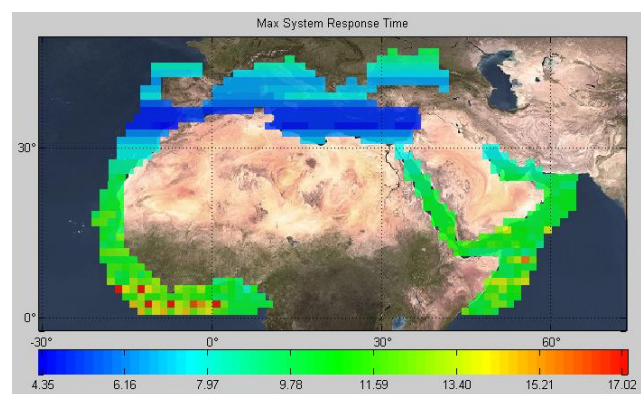
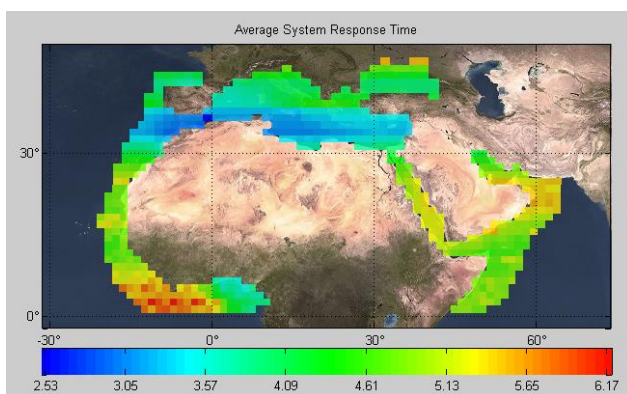
frazionamento si deve attendere il 28° accesso alla stazione. Pertanto il SRT valutato si riduce dell'intervallo corretto, pari a 1 ora, 45 minuti, 17 secondi.

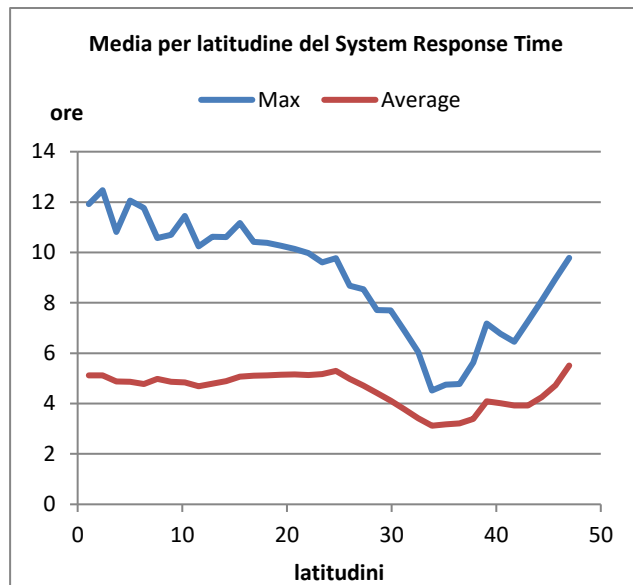
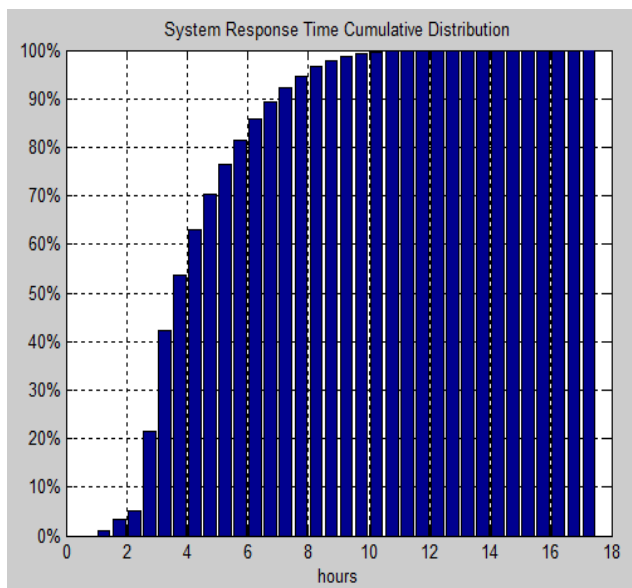
Il terzo passo è stato verificare la corretta gestione di due stazioni di terra. La logica del codice è ordinare ed eventualmente fondere, nel caso di contemporanea visibilità del satellite per vicinanza delle stazioni, gli accessi di un solo satellite alle due stazioni, in modo da ottenere gli accessi ad un'unica stazione equivalente. Le prove eseguite considerando due stazioni di test vicine tra loro hanno effettivamente mostrato che l'ordinamento degli accessi e la fusione di quelli contemporanei avvengono in modo corretto.

L'ultimo passo è stato verificare se una durata di acquisizione non nulla venga processata correttamente dal codice. È stato previsto, infatti, che il satellite possa eseguire l'acquisizione solamente qualora abbia terminato la manovra ad un istante distante almeno la metà del tempo di acquisizione dall'istante di accesso al bersaglio. Tale logica risulta conservativa per le valutazioni di SRT, in quanto accetta solo acquisizioni centrate in azimuth sul bersaglio. I test eseguiti per differenti durate di acquisizione e diversi bersagli hanno mostrato come la logica sia correttamente implementata.

4.3.3 Valutazione del *System Response Time*

Constatata l'identità tra i risultati di STK e del programma MATLAB a parità di ipotesi iniziali e valutata la correttezza del codice scritto, è possibile passare alle valutazioni di SRT considerando tutte le assunzioni del paragrafo 4.3.1. Vengono pertanto presentate le mappe colorimetriche di ASRT e MSRT, il grafico della funzione di distribuzione del SRT valutata su tutti i punti dell'area ed un grafico di sintesi che riporta la media per latitudine di ASRT e MSRT.





È interessante osservare come, anche nel caso del SRT, i valori di medio e, soprattutto, massimo forniscano un'informazione limitata. Se, da un lato, infatti, è vero che alle basse latitudini si sperimentano massimi anche delle 17 ore, dall'altro, la distribuzione statistica globale suggerisce come nel 90% dei casi il SRT sia al di sotto delle 7 ore. Concentrandosi poi sul Mediterraneo, in quest'area i massimi sono sempre al di sotto delle 8 ore e pertanto anche la distribuzione statistica sarà migliore.

CONCLUSIONI

L'elaborato ha analizzato l'utilizzo di sistemi spaziali per la sorveglianza marittima. Con l'obiettivo di fornire un inquadramento chiaro al tema in discussione, il concetto stesso di sorveglianza marittima è stato descritto e posto in relazione con la dottrina militare circa la *Maritime Domain Awareness*. Si è visto come questa sia di fatto composta da ciò che può essere osservabile e conoscibile a livello globale, la *Global Maritime Situational Awareness*, e da ciò che può essere atteso o sospettato, la *Maritime Threat Awareness*. È stato quindi evidenziato come l'attività di sorveglianza marittima sia il presupposto per la consapevolezza di ciò che sta accadendo in mare.

Successivamente sono stati toccati alcuni aspetti operativi di *Ground Segment*. È stata definita la necessità di strumenti per la sottomissione delle richieste di acquisizione, l'analisi di fattibilità e la pianificazione. Sono state dettagliate le informazioni che gli strumenti devono rendere disponibili agli utenti che compongono le richieste ed è stata specificata l'esigenza di un pianificatore che sappia gestire sia attività di monitoraggio, con acquisizioni programmate, sia richieste di acquisizione urgenti. Sono quindi state riportate le informazioni principali che il sistema dovrà presentare, una volta elaborata l'immagine, a corredo di ciascuna traccia.

Sono stati quindi caratterizzati gli scenari operativi relativi alle attività illecite di maggior interesse per la Marina Militare e per cui sarà richiesto l'ausilio del sistema in argomento: pirateria, controllo dei flussi migratori, commerci illeciti e violazione di aree interdette alla navigazione.

Infine si è passati all'attività di studio orbitale e valutazione delle *performance* temporali. Il *design* è stato ottimizzato per massimizzare le capacità di sorveglianza sul Mediterraneo Allargato, con una spiccata attenzione per il Mediterraneo in senso stretto. L'obiettivo è stato conseguire un *System Response Time* dell'ordine delle 3-5 ore almeno nel Mediterraneo, in modo da permettere un utilizzo tattico del sistema. Dopo alcune considerazioni sulle tipologie di orbite da preferire (anche in relazione ai sensori SAR previsti), sono state esplorate e confrontate a livello di *Revisit Time* costellazioni differenti per numero e disposizione dei satelliti, concentrandosi prima sul Mediterraneo e successivamente sul Mediterraneo Allargato. Una configurazione a 8 satelliti è stata quindi scelta come caso di studio per le valutazioni di *System Response Time*. Le ipotesi alla base dei calcoli, per alcuni aspetti non recepibili da STK, hanno richiesto lo sviluppo di un programma in MATLAB, il cui processo di validazione è stato riportato nel capitolo precedente. I risultati delle valutazioni hanno mostrato prestazioni globalmente al di sotto delle 7 ore nel 90% dei casi. Nell'ambito specifico del Mediterraneo le *performance* sono risultate ancora migliori, con valori

massimi tra le 4 ore e mezza e le 7 ore e mezza e valori medi tra le 3 e le 4 ore, centrando così il valore di prestazione desiderato.

Lo studio condotto costituisce il primo passo per lo sviluppo del sistema satellitare in discussione e mette a disposizione informazioni utili per gli sviluppi futuri e valori di riferimento. I passi successivi dovranno essere mossi verso il consolidamento delle ipotesi usate per le valutazioni di *System Response Time* e l'approfondimento delle *performance* (in particolare risoluzione vs. area di copertura) richieste per le immagini SAR.

BIBLIOGRAFIA

W. J. Larson, J. R. Wertz, “Space Mission Analysis and Design”, 3rd edition, Microcosm Press, 1999.

J. R. Wertz, “Orbit & Constellation Design & Management”, Microcosm Press, 2001.

P. Spera, A. Gallon, “Constellation Orbit Design Criteria for a Dual Use EO system”, RTO Meeting Proceedings 061, Oct. 2000.

X. Luo, M. Wang, G. Dai, Z. Song, “Constellation design for earth observation based on the characteristics of the satellite ground track”, Advances in Space Research, Vol. 59, Issue 7, April 2017.

ASI, COSMO-SkyMed Mission, “COSMO-SkyMed System Description & User Guide”.

G. Masetti, F. Orsini, “L’Unione Europea contro la pirateria marittima nel Golfo di Aden”, Informazioni della Difesa, n.6, 2009.