



Università degli Studi di Roma Tor Vergata
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria delle
Tecnologie di Internet

Analisi di copertura di una rete di UAV basata sull'impiego di tecnologie LTE

Candidato:
Daniele Biasini

Relatore:
Franco Mazzenga

Anno Accademico 2011–2012

Alla mia famiglia.

INDICE

1	UNMANNED AERIAL VEHICLE	1
1.1	Componenti	1
1.2	Impieghi tipici degli UAV	3
1.3	Classificazione	6
1.4	Eventi civili che hanno coinvolto UAV	7
2	STANDARD DI TELEFONIA MOBILE <i>lte</i>	8
2.1	Caratteristiche	9
2.1.1	Standard e frequenze	10
2.1.2	Architettura di rete	11
2.1.3	Quality of Service	13
2.1.4	Mobilità e Handover	13
2.1.5	Chiamate vocali	14
2.2	LTE in Italia	15
3	ANALISI DI COPERTURA DELLA RETE	17
3.1	Modellazione dello scenario	17
3.1.1	Area di simulazione	17
3.1.2	Modello del terreno DTM	17
3.1.3	Modello degli ostacoli	18
3.1.4	Modello della mappa	19
3.2	Calcolo attenuazione	21
3.2.1	Propagazione nello spazio libero	21
3.3	Analisi di Copertura della Rete	29
3.3.1	Calcolo dell'area coperta	29
4	RISULTATI	35
4.1	Area facoltà di Ingegneria, Economia e Lettere	36
4.2	Area tra Roma Termini e Colosseo	38
4.3	Area Pantheon	40
	BIBLIOGRAFIA	42

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	Un gruppo di Unmanned Aerial Veichle (UAV)	1
Figura 2	Componentistica interna di un UAV.	2
Figura 3	Vista dalla telecamera di un UAV	3
Figura 4	Apparecchiatura di terra di un UAV.	3
Figura 5	Una fotocamera ad infrarossi montata sul di un UAV	4
Figura 6	L'evoluzione delle tecnologie mobili.	8
Figura 7	OFDMA.	12
Figura 8	Architettura di rete Long Term Evolution (LTE)	12
Figura 9	Stati di un dispositivo mobile LTE.	13
Figura 10	Modello tridimensionale del terreno della zona tra Colle Oppio e la stazione Roma Termini	18
Figura 11	Immagine statica della zona tra Colle Oppio e la stazione Roma Termini ottenuta tramite query http con Google Maps API.	19
Figura 12	Maschera degli ostacoli della zona tra Colle Oppio e la stazione Roma Termini ottenuta con GNU Image Manipulation Program (GIMP) dalla mappa statica.	20
Figura 13	Modello tridimensionale della zona tra Colle Oppio e la stazione Roma Termini.	21
Figura 14	I confini delle zone di Fresnel costituiti da cerchi concentrici nel caso in cui tra le due antenne non sono presenti ostacoli.	23
Figura 15	Nell'origine l'ostacolo a lama di coltello con altezza h.	24
Figura 16	Spirale di Cornu.	25
Figura 17	Andamento del fattore di diffrazione in funzione del parametro di diffrazione.	25
Figura 18	Il segnale si propaga fino all'ostacolo che poi diventa la nuova sorgente.	26
Figura 19	Il segnale si propaga fino all'ostacolo successivo che poi diventa la nuova sorgente, così fino al dispositivo ricevitore.	27
Figura 20	Suddivisione dell'area da analizzare.	30
Figura 21	Pixel passanti per la retta.	31
Figura 22	Proiezioni degli ostacoli sulla retta.	32
Figura 23	Il raggio è la distanza sul piano tra UAV ed utente coperto da segnale.	33

Figura 24	Attenuazione nella zona delle facoltà di Ingegneria, Economia e Lettere dell'Università di Roma Tor Vergata con potenza trasmessa pari a 46dBm. Il raggio medio è pari a 388.3664m. Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 506.1867m. 36	
Figura 25	Attenuazione nella zona delle facoltà di Ingegneria, Economia e Lettere dell'Università di Roma Tor Vergata con potenza trasmessa pari a 24dBm. Il raggio medio è pari a 386.0185m. Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 504.2321m. 37	
Figura 26	Attenuazione nella zona delle facoltà di Ingegneria, Economia e Lettere dell'Università di Roma Tor Vergata con potenza trasmessa pari a 20dBm. Il raggio medio è pari a 384.704m. Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 503.3140m. 37	
Figura 27	Attenuazione nella zona tra Colle Oppio e Roma Termini con potenza trasmessa pari a 46dBm. Il raggio medio è pari a 363.9597m. Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 490m. 38	
Figura 28	Attenuazione nella zona tra Colle Oppio e Roma Termini con potenza trasmessa pari a 24dBm. Il raggio medio è pari a 282.0619m. Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 392.0459m. 39	
Figura 29	Attenuazione nella zona tra Colle Oppio e Roma Termini con potenza trasmessa pari a 20dBm. Il raggio medio è pari a 256.2801m. Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 365.2773m. 39	
Figura 30	Attenuazione nell'area del Pantheon con potenza trasmessa pari a 46dBm. Il raggio medio è pari a 348.2113m. Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 473.0486m. 40	
Figura 31	Attenuazione nell'area del Pantheon con potenza trasmessa pari a 24dBm. Il raggio medio è pari a 294.3916m. Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 408.0747m. 41	
Figura 32	Attenuazione nell'area del Pantheon con potenza trasmessa pari a 20dBm. Il raggio medio è pari a 242.1427m. Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 371.9339m. 41	

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Confronto tra le attuali e future tecnologie mobili	9
Tabella 2	Valori caratteristici del margine di radiocollegamento.	29
Tabella 3	Raggi di copertura nelle tre zone al variare della potenza trasmessa.	36

ELENCO DEGLI ACRONIMI

3GPP	Third Generation Partnership Project Accordo di collaborazione fra enti che si occupano di standardizzare sistemi di telecomunicazioni in diverse parti del mondo.
DTM	Digital Terrain Model Rappresentazione della distribuzione delle quote di un territorio, o di un'altra superficie, in formato digitale.
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Nome dell'interfaccia fisica di trasmissione radio utilizzata nella tecnologia LTE .
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power Potenza isotropica irradiata equivalente, si intende una misura di densità di potenza radio irradiata da un'antenna.
eNB	evolved Node B L'hardware connesso alla rete cellulare che comunica direttamente con terminali mobili
FDD	Frequency Division Duplex Duplex a divisione in frequenza, significa che il trasmettitore radio e il ricevitore operano su diverse frequenze.
GIMP	GNU Image Manipulation Program Software libero per la creazione e modifica di immagini digitali.
HELLFIRE	HELicopter Launched Fire and foRgEt Missile anticarro, nato per dotare gli elicotteri di capacità d'attacco contro veicoli corazzati.
LOS	Line Of Sight Percorso ottico in linea retta fra un dispositivo trasmettitore ed uno ricevitore. La sua rilevanza è dovuta al fatto che, così come la luce, ogni onda elettromagnetica si propaga in linea retta in un mezzo isotropico.
LTE	Long Term Evolution La più recente evoluzione degli standard di telefonia mobile cellulare GSM/UMTS, CDMA2000 e TD-SCDMA.
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Tecnica di trasmissione consistente in un tipo di modulazione a multi-portante, che utilizza cioè un numero elevato di sottoportanti tra loro ortogonali.

QoS	<p>Quality of Service</p> <p>Si riferisce a diversi aspetti correlati a reti di telefonia o tra computer che consentono il trasporto di traffico con requisiti speciali.</p>
SAE	<p>System Architecture Evolution</p> <p>Rete di architettura dello standard LTE di comunicazione wireless di Third Generation Partnership Project (3GPP).</p>
SINR	<p>Signal to Interference plus Noise Ratio</p> <p>Rapporto tra potenza del segnale e la somma della potenza dell'interferenza con la potenza del rumore, misura la qualità della connessione wireless.</p>
SNR	<p>Signal Noise Ratio</p> <p>Anche abbreviato con S/N nell'uso italiano, è una grandezza numerica che mette in relazione la potenza del segnale utile rispetto a quella del rumore in un qualsiasi sistema di acquisizione, elaborazione o trasmissione dell'informazione.</p>
TA	<p>Tracking Area</p> <p>Insieme di celle e di evolved Node B (eNB) gestite dallo stesso nodo di controllo (<i>MME/S-GW</i>).</p>
TDD	<p>Time Division Duplex</p> <p>Duplex a divisione temporale, è l'applicazione del Time Division Multiplexing per separare i segnali in uscita e in entrata.</p>
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	<p>Unmanned Aerial Vehicle</p> <p>Velivolo caratterizzato dall'assenza del pilota umano a bordo. Il suo volo è controllato dal computer a bordo del velivolo, sotto il controllo remoto di un navigatore o pilota, sul terreno o in un altro veicolo.</p>
UGV	Unmanned Ground Vehicle
UE	<p>User Equipment</p> <p>Si usa indicare qualunque dispositivo utilizzato direttamente da un utente finale per comunicare connettendosi alla rete di accesso.</p>

SOMMARIO

In questa tesi è stato analizzato il problema della copertura per un apparato **LTE** montato su un **UAV** considerando scenari di propagazione realistici. In particolare, è stato valutato il raggio di copertura offerto dal sistema **LTE** in diverse condizioni operative e tenendo conto dei contributi di diffrazione dovuti agli ostacoli di varia natura presenti nell'area.

Le mappe geografiche che descrivono le zone di interesse sono state ottenute mediante elaborazione delle informazioni contenute in *Google Maps*. Attraverso il procedimento descritto nel presente lavoro di tesi si è riusciti ad ottenere il Digital Terrain Model (**DTM**) delle aree di interesse con risoluzioni spaziali fino a 5m per pixel.

Le statistiche relative alla presenza e alle altezze degli ostacoli da aggiungere al **DTM** sono state simulate a partire da alcuni dati preliminari ottenuti sempre da *Google Maps*.

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il progresso tecnologico ha contribuito ad affrontare al meglio problematiche in ambiti diversi. In particolare il settore delle telecomunicazioni ha offerto un aiuto fondamentale nelle situazioni di emergenza.

Nella maggior parte dei casi un ostacolo alle operazioni di soccorso può essere causato dalla mancanza di comunicazione tra le parti coinvolte. È molto importante quindi riuscire a fornire, anche provvisoriamente, una rete di soccorso che consenta di coordinare gli aiuti ed evitare ulteriori disordini che potrebbero causare più danni che benefici.

Un problema ricorrente in queste situazioni potrebbe essere quello di gestire una rete al livello del terreno; per esempio nel caso di un terremoto o di attentato terroristico, sarebbe più efficace e più sicuro gestire questo tipo di rete dall'alto. Questo sistema inoltre permetterebbe di evitare ulteriori sprechi risorse umane, garantendo un vantaggio non indifferente. È proprio in questo contesto che va ad inserirsi l'idea di poter gestire comunicazioni tramite [UAV](#), aeromobili a pilotaggio remoto, in grado di trasportare una serie di apparecchiature, come ad esempio un sistema di trasmissione [LTE](#).

L'[UAV](#) quindi può posizionarsi al di sopra della zona interessata in modo da coprire la più vasta area possibile. Per diffondere il segnale in superfici più ampie potrebbe essere necessario l'utilizzo di più [UAV](#). La cooperazione tra più velivoli e il loro posizionamento adeguato garantirebbe una copertura ottimale anche in presenza di numerosi ostacoli o di una morfologia complessa.

La tesi è organizzata come indicato di seguito.

Nel [PRIMO CAPITOLO](#) sono descritte le principali caratteristiche degli [UAV](#) con particolare riferimento al loro funzionamento, i loro principali usi. Sono anche riassunti alcuni eventi storici che hanno riguardato l'impiego di [UAV](#).

Nel [SECONDO CAPITOLO](#) sono descritte alcune caratteristiche dello standard [LTE](#) utili per il presente lavoro di tesi. Ai fini della simulazione sono di interesse sono alcuni aspetti legati allo strato fisico.

Nel [TERZO CAPITOLO](#) viene descritta in dettaglio l'architettura del simulatore usato per l'analisi di copertura. È illustrata la procedura utilizzata per ricavare le mappe [DTM](#) di un'area geografica in base ai dati ottenuti da *Google Maps*. Sono infine richiamati alcuni modelli, tra cui quello di *Epstein-Peterson*, che permettono di descrivere la propagazione delle onde *e.m.* in presenza di

ostacoli. Infine viene presentato il bilancio di collegamento basato sui parametri tipici di un sistema **LTE** operante a potenza ridotta (massimo 20dBm). L'uso della potenza di trasmissione ridotta permette di ridurre il consumo energetico sul **UAV** con conseguente incremento della durata delle batterie.

Nel **QUARTO CAPITOLO** sono presentati e commentati i risultati ottenuti dalle simulazioni.

1

UNMANNED AERIAL VEHICLE

Con il termine *Unmanned Aerial Vehicle* si intendono velivoli senza pilota, i quali possono essere pilotati da remoto o possono volare autonomamente secondo un itinerario prestabilito.

Gli UAV sono attualmente utilizzati per una serie di missioni, incluse le ricognizioni e i ruoli d'attacco; è quindi necessaria la distinzione dai missili. Gli UAV sono definiti come controllabili, e mantengono un volo orizzontale sostenuto e alimentato da un getto o motore alternativo. Un missile può essere considerato come un UAV, ma si distingue da esso poiché il veicolo è l'arma stessa.

La FAA ha racchiuso l'acronimo UAV in quello più generale di Unmanned Aerial System (UAS) riflettente il fatto che questo tipo di veicoli comprende sia sistemi terrestri come gli Unmanned Ground Vehicle (UGV) che gli UAV.

L'utilizzo degli UAV oggi è diventato sempre più necessario, nel caso di operazioni militari il loro uso è ormai consolidato, mentre è in crescita l'utilizzo per missioni civili e non militari.

Il grande vantaggio è il loro impiego in quelle che sono dette missioni *dull, dirty and dangerous* (noiose, sporche e pericolose), grazie agli UAV infatti è possibile risparmiare risorse economiche ed umane.

1.1 COMPONENTI

Nonostante il nome faccia pensare ad un dispositivo indipendente, in grado di volare autonomamente, un UAV è ben più complesso,



Figura 1: Un gruppo di UAV

esso non si riduce al solo velivolo senza pilota, ma anche ad una serie di apparecchiature che permettono il controllo da remoto. La componentistica di un UAV può essere divisa in due: il segmento di volo e il segmento di terra.



Figura 2: Componentistica interna di un UAV.

Segmento di volo

La gestione del volo di un UAV può variare da modello a modello, alcuni sono in grado di decollare o atterrare autonomamente, altri, invece, possono essere completamente gestiti da remoto. Il controllo del volo è gestito da remoto o controllato attraverso un percorso prestabilito.

A bordo è presente il GN&C (sistema di Guida, Navigazione e Controllo), che gestisce il volo anche in assenza di segnale da terra, inoltre a bordo possono essere presenti telecamere che mostrano immagini dall'aeromobile, anche in tempo reale; come nel caso della figura 3, l'UAV controlla una zona agricola.

Segmento di terra

Il controllo a terra di un UAV è costituito da:

- GCS: (Ground Control System) È il controllo a terra del velivolo, svolge molte funzioni, come la rilevazione della posizione dell' UAV, scambio dei dati con il velivolo, permette il pilotaggio manuale e controlla l'orientamento dell'Antenna Tracking System.
- Ground Computer: Permette l'elaborazione dei dati di telemetria e delle immagini inviate dall'UAV con la telecamera a bordo.



Figura 3: Vista dalla telecamera di un UAV

- Antenna tracking system: L'uso di questo tipo di apparecchiature permette il controllo del velivolo durante il volo.
- Joystick: Questo strumento permette il controllo manuale del velivolo.

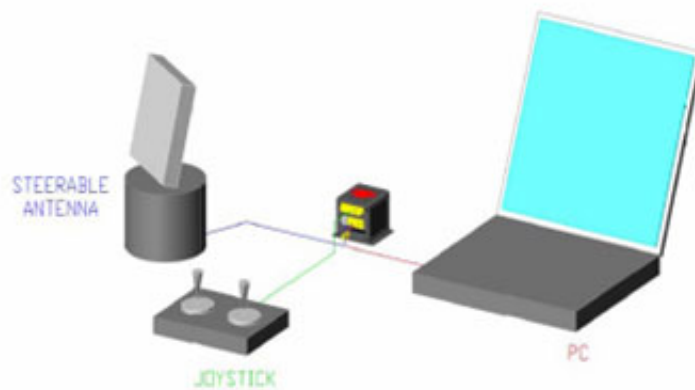


Figura 4: Apparecchiatura di terra di un UAV.

1.2 IMPIEGHI TIPICI DEGLI UAV

Gli UAV, grazie alla possibilità di essere controllati da remoto, si prestano facilmente ad utilizzi di vario tipo.

Telerilevamento

Attraverso il telerilevamento è possibile monitorare e quindi ricavare informazioni, qualitative e quantitative, relative all'area coperta

dall'UAV.

Questo tipo di UAV utilizza una vasta gamma di sensori come il sensore di misura dello spettro elettromagnetico, sensore a raggi gamma, sensori biologici e chimici. I sensori elettromagnetici includono principalmente telecamere a spettro visivo o a infrarossi (Fig. 5) come i radar, sono raramente utilizzati anche altri rivelatori di onde elettromagnetiche come microonde e sensori spettro ultravioletto.



Figura 5: Una fotocamera ad infrarossi montata sul di un UAV

I sensori biologici sono sensori in grado di rilevare la presenza di microrganismi nell'aria e vari altri fattori biologici, mentre i sensori chimici utilizzano spettroscopia laser per analizzare la concentrazione di ciascun elemento in aria.

Sorveglianza Aerea

Grazie agli UAV è possibile sorvegliare vaste aree a basso costo, questo tipo di operazioni comprende: mappatura degli incendi, monitoraggio del bestiame, sicurezza domestica, stradale e pattugliamento anti-pirateria. Molto importante è quest'ultimo aspetto, la sicurezza territoriale, delle frontiere e lotta ai narcotrafficienti, infatti nel 2011, gli Stati Uniti hanno collaborato con il Messico per arginare il fenomeno dell'immigrazione clandestina e del traffico di sostanze stupefacenti attraverso il monitoraggio del loro confine

Indagini Geofisiche

Gli UAV sono impiegati anche in indagini geomagnetiche, dove il differenziale del campo magnetico terrestre è utilizzato per calcolare la struttura della sottostante roccia magnetica, spesso ciò è utile per cercare di predire la posizione di miniere minerarie e petrolifere.

Trasporto

Una delle meno comuni funzioni degli UAV è quella del trasporto merci. La maggior parte dei carichi utili sono contenuti in un vano di carico interno, i carichi esterni invece possono essere legati alla fusoliera o fissati alle ali, in questo caso però ne risentirà l'aerodinamica, quindi sono spesso racchiusi in un guscio.

Ricerca Scientifica

Gli UAV sono gli unici in grado di penetrare in aree che possono essere troppo pericolose per le imbarcazioni pilotate. Per esempio la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), nel 2006 ha iniziato ad utilizzare gli UAV come cacciatori di uragani, questo tipo di aeromobili è in grado di volare all'interno dell'uragano per comunicare quasi in tempo reale dati come pressione barometrica standard e dati di temperatura, anche molto vicini alla superficie dell'acqua, direttamente al National Hurricane Center in Florida. Ulteriori applicazioni per aerei senza pilota possono essere quelli del produttore britannico UAVSI, che ha progettato una variante degli UAV particolarmente adatta a climi rigidi, come l'Antartide.

Attacchi Armati

Gli MQ-1 Predator sono UAV armati con missili HELicopter Launched Fire and forGt (HELLFIRE), sempre più utilizzati dagli Stati Uniti come piattaforme per colpire bersagli a terra. I Predators armati sono stati utilizzati alla fine del 2001 da basi in Pakistan e Uzbekistan, per lo più volti ad assassinare persone di alto profilo (capi terroristi, ...) in Afghanistan. Da allora, ci sono stati molti casi di attacchi di questo tipo che si svolgono in Afghanistan, Pakistan, Yemen e Somalia. Il vantaggio di utilizzare un veicolo senza pilota, piuttosto che un aereo con equipaggio, in questi casi è quello di evitare un imbarazzo diplomatico nel caso in cui l'aeromobile venisse abbattuto e venissero catturati i piloti, dal momento che i bombardamenti si svolgono in paesi ritenuti cordiali e senza il permesso ufficiale di quei paesi.

Ricerca e Salvataggio

Un altro ruolo importante per gli UAV è quello nelle operazioni di ricerca e soccorso, grazie ad essi, infatti, è possibile raggiungere agevolmente zone colpite da disastri naturali o causati dall'uomo, per permettere ricognizioni in tempi rapidi. Proprio su un aspetto di questo particolare uso si soffermerà questa tesi: in queste situazioni sarà proprio compito dell'UAV ripristinare le comunicazioni in modo da consentire agli operatori di soccorso di

dialogare tra loro, ed eventualmente con le persone (civili) coinvolte nella crisi.

L'utilizzo degli UAV considerato in questa tesi è stato quello del ripristino e gestione delle comunicazioni in aree colpite da crisi in cui è molto importante riuscire a mantenere le connessioni attive per facilitare le operazioni di soccorso a seguito di calamità naturali o da avvenimenti particolari (terremoti, esondazioni, incidenti stradali, ...).

1.3 CLASSIFICAZIONE

Gli UAV in genere rientrano in *sei* categorie a seconda della loro funzione, ultimamente però i ruoli svolti raccolgono più di una sola funzione in un solo aeromobile:

TARGET AND DECOY Fanno da obiettivo aereo o terrestre simulando un aeromobile o un missile nemico.

RECONNAISSANCE Forniscono informazioni sul campo di battaglia.

COMBAT Hanno la capacità di attaccare in missioni ad alto rischio.

LOGISTICS UAV specificamente progettato per il carico e la gestione della logistica.

RESEARCH AND DEVELOPMENT Utilizzati per sviluppare ulteriormente le tecnologie UAV.

CIVIL AND COMMERCIAL UAVS UAV sviluppati principalmente per applicazioni civili e commerciali.

È possibile un altro tipo di classificazione in termini di altitudine/-range:

HANDHELD (altitudine di circa 600 m), circa 2 km di range.

CLOSE (altitudine massima 1500 m), più di 10 km di range.

NATO TYPE (massima altitudine 3000 m) più di 50 km di range.

TACTICAL (altitudine di circa 5500 m), circa 160 km di range.

MALE (altitudine media, lunga durata) altitudine oltre 9000 m, più di 200 km di range.

HALE (elevata altitudine, lunga durata) altitudine oltre 9100 m, range indefinito.

HYPERSONIC (alta velocità, supersonico (Mach 1–5) o ipersonico (Mach 5+)) altitudine di circa 15200 m (sub-orbitale) e range oltre 200 km.

1.4 EVENTI CIVILI CHE HANNO COINVOLTO UAV

Come già detto nell'introduzione, il vantaggio che deriva dall'utilizzo degli UAV è l'utilizzo nelle missioni *dull, dirty and dangerous*, negli ultimi anni ci sono state varie occasioni che hanno coinvolto gli UAV:

- Un importante coinvolgimento non bellico degli UAV è stato durante il terremoto del Tohoku del 2011. I velivoli americani *Global Hawk* hanno sorvolato la Centrale nucleare di Fukushima Dai-ichi, in Giappone, per poter addentrarsi nelle zone vietate per le forti radiazioni. Lo scopo principale è stato quello di controllare i reattori dopo le esplosioni causate dal forte sisma.
- In Italia un recente utilizzo degli UAV è stato durante il recente terremoto in *Emilia*, sono stati utilizzati alcuni velivoli per controllare le aree inaccessibili a causa delle macerie.

2

STANDARD DI TELEFONIA MOBILE *LTE*



Il sistema **LTE** è un esempio importante di tecnologia radiomobile di quarta generazione (4G) in grado di offrire servizi a larga banda. Se l'attuale generazione di reti di telecomunicazione mobile è nota come 3G, **LTE** è, impropriamente, commercializzato come 4G (Fig. 6).

Secondo **3GPP**, in **LTE** sono identificati una serie di requisiti ad alto livello;

- Riduzione dei costi per bit.
- Fornitura di più servizi a costi inferiori e con migliore esperienza utente.
- Flessibilità nell'utilizzo di bande frequenza nuove o esistenti.
- Architettura semplificata.

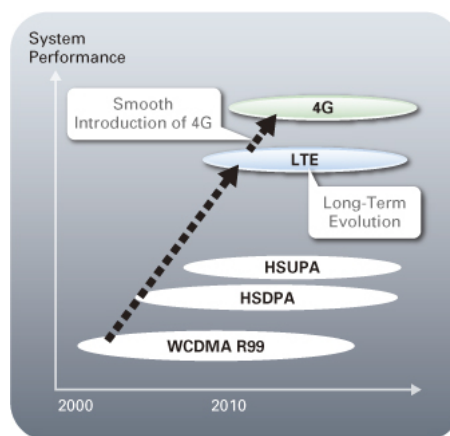


Figura 6: L'evoluzione delle tecnologie mobili.

- Consentire un ragionevole consumo energetico del terminale.

Nonostante ci sia una sostanziale differenza rispetto ai suoi predecessori, **LTE** è considerato un'evoluzione dello standard 3G. Nella tabella 1, sono mostrate le principali differenze con le tecnologie precedenti:

Tabella 1: Confronto tra le attuali e future tecnologie mobili

		WCDMA (UMTS)	HSDPA	HSDPA+	LTE	LTE Advanced
Max Downlink Speed		384 kb/s	14 Mb/s	42 Mb/s	326,4 Mb/s	3,3 Gb/s
Max Uplink Speed		128 kb/s	5,7 Mb/s	11 Mb/s	86,4 Mb/s	Sconosciuto
Latency round trip time (ms)		150	100	50	10	Sconosciuto
3GPP Releases		Rel 99/4	Rel 5/6	Rel 7	Rel 8	Rel 10
Access methodology		CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA / SC-FDMA	OFDMA Ibrido / SC-FDMA

I motivi che hanno spinto a questa nuova tecnologia sono stati vari:

- Necessità di garantire la continuità della competitività del sistema 3G per il futuro.
- Domanda degli utenti per velocità di trasferimento dati più elevate e qualità del servizio.
- Sistema ottimizzato di commutazione a pacchetto.
- Continua richiesta di riduzione dei costi (CAPEX e OPEX).
- Complessità bassa.
- Evitare un'inutile frammentazione delle tecnologie per la banda di funzionamento.

2.1 CARATTERISTICHE

Lo standard **LTE** affronta l'aggiornamento dal 3G *UMTS* verso quello che sarà chiamato standard comunicazione mobile di quarta generazione 4G. La maggior parte del lavoro mira a semplificare l'architettura del sistema, per esempio per le chiamate vocali, come discusso nel paragrafo 2.1.5, da una rete a commutazione a pacchetto (per i dati) e a commutazione a circuito (per le chiamate vocali) dell'attuale

tecnologia *UMTS*, verso un'architettura completamente basata su *IP*. L'interfaccia fisica di trasmissione radio utilizzata in *LTE* è detta *E-UTRA*, le sue principali caratteristiche sono:

- Velocità di download di picco di 299Mbit/s e upload fino a 75.4Mbit/s.
- Latenze ridotte (inferiori ai 100 ms per il passaggio dallo stato idle allo stato active, ed inferiori ai 5 ms per piccoli pacchetti IP)
- Migliorato il supporto per la mobilità, esemplificato dal supporto per i terminali in movimento fino a 350km/h o 500km/h a seconda della banda di frequenza.
- *OFDMA* per il downlink¹ e *SC-FDMA* per l'uplink².
- Supporto per i sistemi di comunicazione Frequency Division Duplex (*FDD*) e Time Division Duplex (*TDD*) e half-duplex *FDD* con la stessa tecnologia di accesso radio.
- Supporto per dimensioni delle celle variabili: da decine di metri di raggio (femto e picocelle) fino a 100km di raggio (macrocelle). Le bande di frequenza più basse sono utilizzate nelle zone rurali, con dimensioni cellulari da 5km con prestazioni ottimali, fino a 100km con prestazioni accettabili. Nelle aree urbane e urbane, bande di frequenza più elevate (ad esempio 2,6GHz in EU) sono usate per sostenere banda larga ad alta velocità mobile. In questo caso, le dimensioni delle celle può essere 1km o anche meno.
- Supporto per almeno 200 clienti attivi per cella da 5MHz.
- Supporto per l'inter-operabilità e la coesistenza con tecnologie precedenti: gli utenti possono avviare una chiamata o il trasferimento di dati in una zona con uno standard *LTE*, e, se la copertura non è disponibile, continuare l'operazione senza alcuna azione da parte loro passando a tecnologie precedenti come *GSM / GPRS* o *W-CDMA* o anche le reti *UMTS*.
- Elevata efficienza spettrale (numero di bit/s trasmessi per ogni Hz impiegato) 3 volte superiore alla più evoluta versione dell'*UMTS*, ovvero l'*HSPA*.

2.1.1 Standard e frequenze

Nell'Unione Europea lo standard *LTE* lavora sulle seguenti bande di frequenza:

¹ Collegamento tra una stazione base e la stazione mobile ad essa associata

² Percorso dei dati da un telefono cellulare alla centrale

800 MHz in Italia dal 2013 sarà possibile sfruttare questa banda non appena sarà completo il passaggio al digitale terrestre

900 MHz questa banda attualmente impegnata dal GSM attraverso un *refarming dello spettro* sarà disponibile per l'**LTE**

1800 MHz entro il 2012 saranno disponibili alcuni canali occupati dal GSM

2600 MHz frequenze libere tranne che in alcune zone utilizzate dal ministero della difesa o da radar

OFDMA

Uno degli elementi chiave di **LTE** è l'uso di Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (**OFDM**) per trasportare il segnale e gli schemi di accesso associati: **OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) e **SC-FDMA** (Single Carrier Frequency Division Multiple Access).

OFDM è già utilizzato in altri sistemi come **WLAN** e **WiMAX** per l'audio e il video *broadcasting*; l'**OFDM** ha molti vantaggi tra cui la robustezza al *fading* multiplo e alle interferenze. **OFDM** è un tipo di trasmissione che usa un gran numero di portanti vicini tra loro, modulati con basso *symbol rate*. Normalmente ci si aspetterebbe che questi segnali interferiscano l'uno con l'altro, ma facendo in modo che siano ortogonali tra loro non c'è interferenza reciproca. Ciò si ottiene spaziando le portanti del reciproco del periodo di simbolo.

Questo significa che quando i segnali sono demodulati avranno un numero intero di cicli nel periodo di simbolo e il loro contributo si somma a zero, quindi non vi è alcun contributo di interferenza. I dati da trasmettere sono suddivisi su tutte le portanti, e attraverso l'utilizzo di tecniche di correzione di errore, se alcune frequenze portanti vengono perse a causa di effetti di *fading* multiplo, i dati possono essere ricostruiti.

Inoltre avendo dati trasmesso ad un basso *symbol rate* attraverso tutte le portanti significa che gli effetti di riflessione e interferenza intersimbolica possono essere superati. Significa anche che reti a singola frequenza, in cui tutti i trasmettitori possono trasmettere sul canale stesso, possono essere implementate.

2.1.2 Architettura di rete

La rete di accesso di **LTE**, detta anche Evolved Universal Terrestrial Radio Access (**E-UTRA**), è costituita da un unico elemento, il cosiddetto **eNB**. In **LTE**, al contrario che nelle precedenti tecnologie, è possibile semplificare l'architettura di rete nel solo **eNB** (Fig. 8), in quanto tutti dati, anche quelli voce, viaggiano su protocolli a pacchetto; il grande vantaggio, inoltre, è che i nodi sono interconnessi tramite

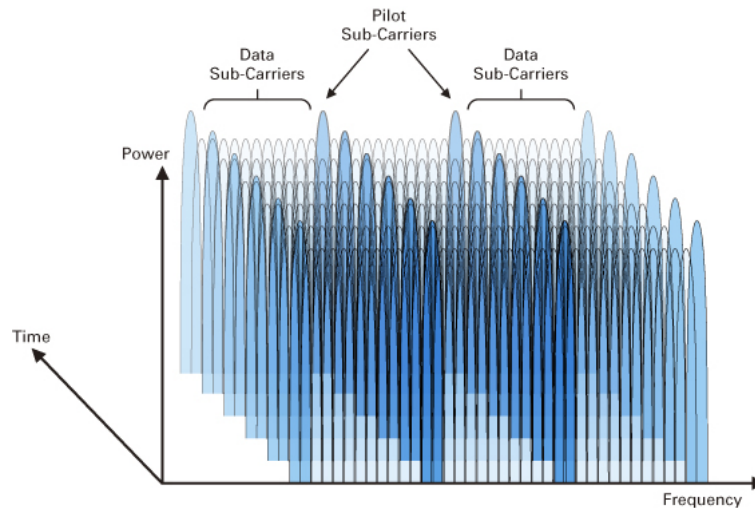


Figura 7: OFDMA.

interfacce standardizzate in modo da garantire la compatibilità con le tecnologie precedenti.

Gli **eNB** sono interconnessi tramite le interfacce X2. Si presume che esista sempre un'interfaccia X2 tra gli **eNB** che devono comunicare tra loro, ad esempio, per il supporto del trasferimento dell'User Equipment (**UE**) nello stato *active*. Gli **eNB** sono collegati anche mediante l'interfaccia S1 alla EPC (Evolved Packet Core). L'interfaccia S1 supporta una relazione multi-a-molti tra *eNB* e **eNB**.

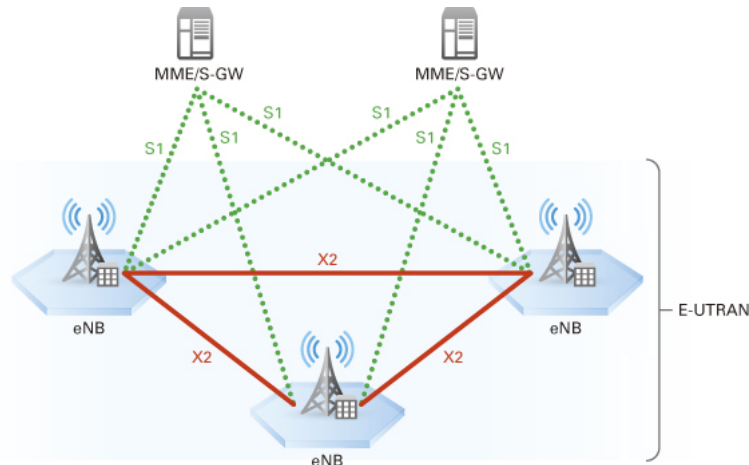


Figura 8: Architettura di rete LTE

User Equipment

Il dispositivo LTE è detto **UE** come già avveniva con l'UMTS, questo termine sta proprio ad evidenziare l'avanzato apparato tecnologico che si porta dietro l'utente. L'**UE** è costituito da due parti: il *Mobile Equipment*, cioè l'hardware che costituisce il dispositivo e il

software che permette la connessione alla rete, e la *Universal Subscriber Identity Module*, il circuito integrato che contiene le informazioni legate all'utente, alla rete e ai servizi supportati.

2.1.3 Quality of Service

L'**LTE** fornisce diverse qualità di servizio **Quality of Service (QoS)**, ogni flusso informativo è associato ad una specifica classe di **QoS**, i livelli di **QoS** offerti sono due:

GBR (minimum Guaranteed Bit Rate): questo tipo di servizio offre risorse dedicate per tutta la durata della trasmissione, alti data rate, ritardi contenuti e tassi d'errore contenuti; l'utilizzo principale è quello voce, come le chiamate vocali o il *VoIP*.

NON-GBR : questo servizio sono utilizzati per applicazioni che non richiedono bitrate particolarmente elevati, come il web browsing o i trasferimenti FTP.

2.1.4 Mobilità e Handover

Un terminale all'interno di **LTE** può trovarsi in tre stati: *detached*, *active*, *idle*. Non appena il dispositivo viene acceso, esso si trova nello

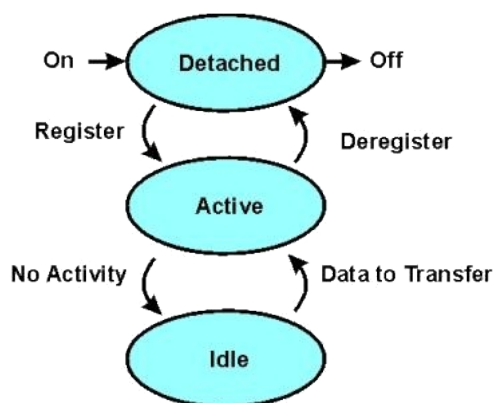


Figura 9: Stati di un dispositivo mobile **LTE**.

stato *detached*: è attivo ma non è ancora connesso alla rete. Questa è la fase dell'instaurazione della connessione, l'utente è registrato presso l'eNB e passa nello stato *active*. Infine, se l'utente non trasmette o riceve per un determinato tempo passa nello stato *idle*.

La posizione di un utente è nota alla rete attraverso la granularità di una Tracking Area (**TA**), l'**UE** è memorizzato in un'area geografica, che potrebbe essere una **TA** o un elenco di **TA**; il nodo di controllo avvia il *paging* per ciascun **eNB** con celle appartenenti all'**UE**, l'utente passa da *idle* a *active* e può ricevere una chiamata. Ogni **eNB** può

contenere celle appartenenti a diverse **TA**, mentre ogni cella può appartenere ad una sola **TA**.

Con riferimento alla figura 8 in **LTE** esistono due tipi di *Handover*, essi si distinguono in base all'interfaccia su cui si muove l'**UE**, *X2* o *S1*:

x2 Si riferisce al caso in cui l'utente si muove tra due **eNB**, sempre gestiti dallo stesso *aGW*, cioè all'interno della stessa **TA**. L'*handover* avviene sull'interfaccia *X2* tra l'**eNB** su cui è attualmente agganciato (*serving*) e il prossimo **eNB** che servirà l'**UE** (*target*), solo questi due nodi sono coinvolti, di conseguenza l'*handover* è rapido e richiede poche risorse. Al termine della procedura l'*aGW* è avvisato del cambio di posizione.

Inoltre a seconda delle esigenze dell'**UE** possono avvenire due tipi di *handover*, i quali, ovviamente, sono strettamente legati al **QoS** (paragrafo 2.1.3):

- *seamless*: questo tipo di *handover* è particolarmente sensibile ai ritardi, quindi è utilizzato nel caso in cui l'**UE** abbia bisogno di servizi *real-time* come, ad esempio, una chiamata vocale.
- *lossless*: in questo tipo di *handover*, invece, lo scopo principale è mantenere un basso tasso di errori e ridurre le perdite di pacchetti.

s1 In questo caso l'**UE** si muove da una **TA** ad un'altra. Questo tipo di *handover* in **LTE** è di tipo *hard*, la connessione è brevemente interrotta durante il passaggio da un **eNB** ad un altro, il motivo principale di questa interruzione è l'assenza di un nodo di controllo che gestisca il traffico di segnalazione. Di conseguenza la rete è semplificata ad esempio rispetto a quella *UMTS*.

2.1.5 Chiamate vocali

Lo standard **LTE** supporta solo la *commutazione a pacchetto* nelle sue reti IP. Le chiamate vocali nel *GSM*, *UMTS* e *CDMA* sono a circuito, quindi con l'adozione dell'**LTE**, gli operatori telefonici dovrebbero riprogettare la loro rete voce.

La differenza principale tra commutazione a pacchetto ed a circuito è che nella prima il flusso di informazione è segmentato in *pacchetti* di lunghezza limitata o fissa, come avviene in internet con IP; al contrario, la commutazione a circuito, prevede il frazionamento della capacità trasmissiva totale per ogni utente.

Per ovviare alla riprogettazione della rete sono state proposte tre soluzioni:

VOLTE (Voice Over **LTE**) Questo tipo di approccio prevede di consegnare la voce come se fosse un flusso all'interno del trasporto dati di **LTE**, in questo modo si aggira la commutazione a pacchetto continuando ad utilizzare quella a circuito.

CSFB (Circuit Switched FallBack) In questo approccio, **LTE** fornisce il servizio dati e, quando richiesto il servizio voce, automaticamente ricade nella commutazione a circuito.

SVLTE (Simultaneous Voice and **LTE**) Questo approccio, invece, fa coesistere le due tecnologie, adottando l'utilizzo della commutazione a pacchetto per la connessione dati e della commutazione a circuito per le chiamate vocali.

Un altro tipo di approccio prevederebbe di utilizzare la connessione dati anche per le chiamate voci, come accade per *Google Talk* o *Skype*, ma è troppo complesso perché costringerebbe ogni utente ad avere una connessione attiva sul proprio dispositivo.

La maggior parte dei sostenitori principali di **LTE** hanno preferito e promosso *VoLTE* fin dall'inizio, anche se la soluzione migliore sarebbe di passare alla commutazione a pacchetto. Nei paesi dove questa tecnologia è stata già adottata, nell'attesa della standardizzazione del *VoLTE*, a causa dell'elevata domanda per le chiamate vocali, è stato necessario introdurre **CSFB** come misura provvisoria. Quindi quando si effettua o si riceve una chiamata vocale, i telefoni **LTE** ricadranno sulla vecchie reti 2G e 3G per la durata della chiamata.

LTE supporta inoltre le chiamate vocali ad alta qualità (*Voice HD*), per garantire la compatibilità, **3GPP** richiede il codec *AMR* a banda stretta, ma il codec consigliato per il *VoLTE* è a banda larga, inoltre, nelle reti **3GPP** è obbligatorio il campionamento a 16KHz. Questo tipo di tecnologia, però, richiede che sia il mittente che il destinatario la supportino.

2.2 LTE IN ITALIA

In Italia, il 30 settembre 2011 si è conclusa l'asta per la concessione delle frequenze 4G **LTE** delle tre frequenze disponibili: 800, 1800 e 2600MHz. Il nella Gazzetta Ufficiale viene pubblicato il bando per l'assegnazione delle frequenze agli operatori mobili italiani:

- banda 800MHz: *“fino a 6 lotti di frequenze FDD, ciascuno di ampiezza pari a 5 MHz in spettro accoppiato, assegnabili su base nazionale, nominati da 1 a 6.”*

Di questi sei lotti ne sono stati acquistati due per ognuna di queste compagnie: *Vodafone Italia*, *Telecom Italia* e *Wind Telecomunicazioni*.

- banda 1800MHz: *“fino a 3 lotti di frequenze FDD, ciascuno di ampiezza pari a 5 MHz in spettro accoppiato, assegnabili su base nazionale, nominati da 1 a 3.”*

Un blocco a testa è stato aggiudicato da *Vodafone Italia*, *Telecom Italia* e *3 Italia*.

- banda 2000MHz: *“1 lotto di frequenze TDD di ampiezza pari a 15 MHz, assegnabile su base nazionale, nominato lotto A.”*

Per questo lotto non è stata effettuata nessuna offerta.

- banda 2600MHz: *“fino a 12 lotti di frequenze FDD, ciascuno di ampiezza pari a 5 MHz, in spettro accoppiato, assegnabili su base nazionale, nominati da 3 a 14, e 2 lotti di frequenze TDD, ciascuno di ampiezza pari a 15 MHz, assegnabili su base nazionale, nominati lotto B e C, con esclusione delle frequenze 2500-2510 MHz e 2620-2630 MHz nei lotti FDD e delle frequenze 2600-2620 MHz nei lotti TDD.”*

³ Italia e Wind Telecomunicazioni si aggiudicano quattro blocchi, tre Vodafone Italia e Telecom Italia.

3

ANALISI DI COPERTURA DELLA RETE

Il simulatore ha permesso di ottenere i risultati riguardo la copertura dell'apparato [LTE](#),

3.1 MODELLAZIONE DELLO SCENARIO

In questa tesi è stato possibile simulare un modello tridimensionale degli ostacoli relativo ad una mappa esistente utilizzando la rappresentazione digitale delle quote di un territorio, usufruendo delle cosiddette mappe [DTM](#). Sopra questo base è stato applicato un modello degli ostacoli, per generare uno scenario *simile* a quello reale.

3.1.1 Area di simulazione

Per ottenere i dati relativi all'elevazione di una determinata area è stato necessario suddividere l'area come fosse una griglia, ogni elemento della griglia è detto *pixel*, in questa tesi ogni pixel ha le dimensioni di un quadrato di lato 5 m.

Successivamente è stato necessario assegnare ad ogni pixel la latitudine e la longitudine associata al centro di esso, ogni coordinata dista quindi dalle adiacenti di circa 5 m. L'area presa in considerazione è di circa $1\text{km} \times 1\text{km}$, quindi con una semplice divisione si ottiene che l'area, suddivisa in pixel, presa in esame equivale ad una matrice formata da 200×200 elementi, di cui ogni elemento contiene le coordinate esatte del centro del pixel.

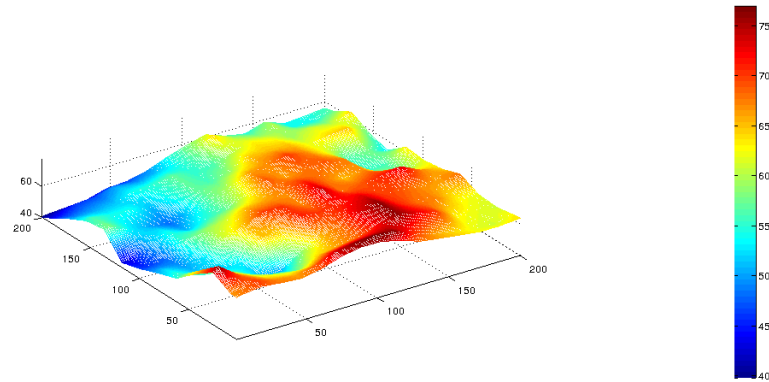
È stato quindi sviluppato un semplice programma in *Java* che permette la stampa su file di questi quarantamila elementi della matrice, elencati in colonna.

3.1.2 Modello del terreno DTM

Attraverso l'utilizzo del sito <http://www.gpsvisualizer.com/> è stato possibile importare la matrice output del programma citato nel paragrafo [3.1.1](#) per ottenere l'elevazione di ogni coordinata. Le elevazioni elencate nel file di output sono state rielaborate in una matrice con un altro programma in *Java*, il risultato è quindi una matrice 200×200 contenente i dati dell'elevazione per ogni coordinata. In Matlab è possibile effettuare un plot della matrice per rappresentare

in tre dimensioni il modello del terreno come mostrato nella figura 10.

Figura 10: Modello tridimensionale del terreno della zona tra Colle Oppio e la stazione Roma Termini



3.1.3 Modello degli ostacoli

Il processo che ha portato ad alla modellazione degli ostacoli è formato da più passi:

- Usufruento delle *API* di Google Maps è possibile fare una query `http` per ottenere la mappa dell'area interessata, in particolare per quanto riguarda l'area della zona tra Colle Oppio e la stazione Roma Termini è stato utilizzato l'url
`http://maps.google.com/maps/api/staticmap?center=41.895805,12.499113&zoom=15&size=1000x1000&sensor=false`
`center=41.895805,12.499113`
indica le coordinate del centro della mappa statica.
`zoom=15`
indica il livello di zoom.
`size=1000x1000`
rappresenta la risoluzione dell'immagine.
`sensor=false`
in alcune applicazioni potrebbe essere necessario il sensore GPS per ottenere la posizione dell'utente, ma non è questo il caso
`&style=feature:all|element:labels|visibility:off`
infine aggiungendo questa stringa al termine dell'url è pos-

sibile togliere le etichette per visualizzare esclusivamente l'immagine della mappa.

il risultato è rappresentato nell'immagine successiva (11).

Figura 11: Immagine statica della zona tra Colle Oppio e la stazione Roma Termini ottenuta tramite query http con Google Maps API.



- Il passo successivo è stato quello di rielaborare l'immagine per ottenere una maschera contenente gli ostacoli. Per tale scopo è stato utilizzato [GIMP](#), software libero per la creazione e modifica di immagini digitali.

Per prima cosa è stata desaturata l'immagine, poi con l'aiuto di Google Earth è stato possibile evidenziare le aree piane e gli ostacoli; è molto importante distinguere le due zone perché secondo i calcoli svolti in questa tesi, l'utente non può posizionarsi in corrispondenza degli ostacoli. Avere quindi un modello degli ostacoli permette di verificare la copertura del sistema [LTE](#) dell'[UAV](#) in base alla posizione dell'utente.

Sono stati considerati come ostacoli costruzioni, monumenti e palazzi, quindi parchi, strade o, come in questo caso, la stazione in cui l'utente può sostare. Gli ostacoli sono stati evidenziati in nero, tutto il resto è in bianco.

3.1.4 Modello della mappa

L'ultimo passo per arrivare ad un modello completo della mappa è stato quello di unire i due passaggi descritti nei due pa-

Figura 12: Maschera degli ostacoli della zona tra Colle Oppio e la stazione Roma Termini ottenuta con [GIMP](#) dalla mappa statica.



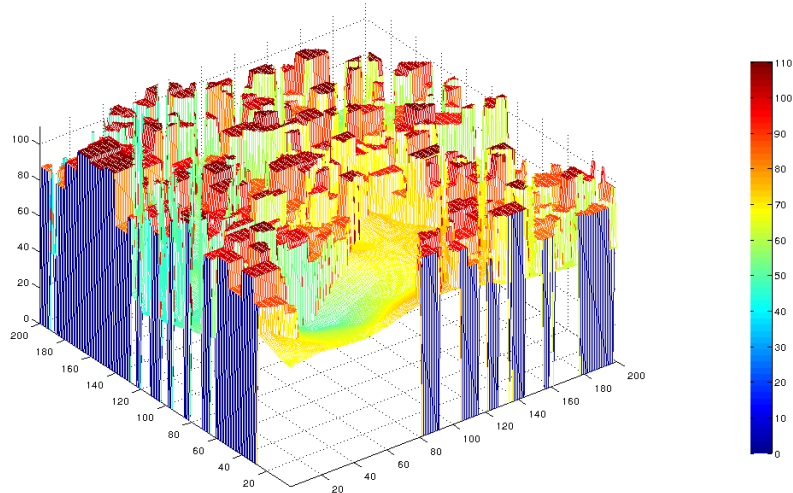
ragrafi precedenti. Il modello del terreno e la maschera degli ostacoli sono stati importati in Matlab, il risultato è quindi un modello tridimensionale della mappa sul quale è applicata una maschera rappresentante la posizione di ogni ostacolo.

In Matlab è stato possibile sfruttare questo modello per ottenere una fedele rappresentazione tridimensionale dello scenario scelto. Sono stati utilizzati i dati dei modelli tridimensionali di *Google Earth* come altezza, larghezza e lunghezza degli ostacoli, poi con l'aiuto di Matlab si è cercato di utilizzare questi dati per generare ostacoli con altezza, larghezza e lunghezza variabili nel *range* ottenuto da *Google Earth*.

Il risultato è rappresentato nell'immagine sottostante.

A questo punto è possibile utilizzare queste informazioni per modellare la copertura dell'apparato [LTE](#) dell'[UAV](#) su questo tipo di scenario.

Figura 13: Modello tridimensionale della zona tra Colle Oppio e la stazione Roma Termini.



3.2 CALCOLO ATTENUAZIONE

Prima di descrivere come è stata calcolata l'attenuazione pixel \times pixel è necessario richiamare alcuni concetti di propagazione dell'onda elettromagnetica.

3.2.1 Propagazione nello spazio libero

Per propagazione nello spazio libero si intende una trasmissione del segnale elettromagnetico attraverso lo spazio libero o in mezzi tenui come l'atmosfera, in generale essa può suddividersi in radiopropagazione in un canale radio tra punti fissi (ponte radio) e radiopropagazione in un canale radiomobile tra terminali mobili e le stazioni radiobase.

Attenuazione

Un aspetto fondamentale di questo tipo di propagazione è l'attenuazione, questa può essere di due tipi:

ATTENUAZIONE ISOTROPICA è tipica dello spazio libero e la potenza diminuisce come $\frac{1}{d^2}$:

$$p(d) = \frac{P_T}{4\pi d^2}$$

ATTENUAZIONE SUPPLEMENTARE si aggiunge a quella isotropica se il mezzo è diverso da quello vuoto.

Fading

Nei collegamenti via etere all'ingresso del ricevitore il segnale giunge con improvvise e casuali variazioni di breve durata sia in ampiezza che in fase. Tali fluttuazioni sono note come fading o evanescenza. Il fenomeno è dovuto a varie cause. Il *fading per attenuazione* è dovuto alle variazioni fisiche dell'atmosfera che producono diverse attenuazioni del segnale in funzione della frequenza. Il *fading per interferenza* è dovuto all'interferenza tra i diversi segnali che partendo dal trasmettitore seguono molteplici percorsi prima di giungere al ricevitore. I segnali ricevuti hanno ampiezze e fase continuamente variabili poiché dipendono dallo stato fisico dell'atmosfera (pioggia, temporali, ...) dalla natura del suolo (mare, monti, ...) e dal cammino che le onde elettromagnetiche seguono (onde dirette, onde riflesse dal suolo, ...). I ricevitori sono dotati di opportuni sistemi di regolazione automatica atti a compensare ma non eliminare il fenomeno di fading.

Diffrazione

Il fenomeno della diffrazione permette la propagazione dei segnali radio sulla superficie curva della Terra, oltre l'orizzonte e oltre i vari ostacoli che può incontrare. Anche nel caso in cui la potenza del segnale ricevuto decresce rapidamente quando il trasmettitore si muove all'interno di regioni così dette in ombra, il segnale generato dalla diffrazione è sufficientemente potente da produrre un segnale utile.

La diffrazione può essere spiegata mediante il principio di Huygen, che afferma che tutti i punti appartenenti ad un fronte d'onda possono essere considerati come sorgenti di nuove onde; tali onde si combinano per produrre un nuovo fronte che si propaga nella stessa direzione del primo; è questo secondo fronte d'onda che permette la propagazione del segnale nelle regioni in ombra.

Zone di Fresnel

Mediante le zone di Fresnel è possibile caratterizzare l'attenuazione dovuta a diffrazione in relazione alla differenza di cammino che le onde devono compiere per aggirare un ostacolo posto tra trasmettitore e ricevitore. Le zone di Fresnel rappresentano regioni successive in cui le onde secondarie devono percorrere, per raggiungere il ricevitore dal trasmettitore, una distanza maggiore di $n\frac{\lambda}{2}$ rispetto al cammino lungo la Line Of Sight (LOS). La differenza tra il cammino diretto e il cammino rifratto che attraversa ogni cerchio è $n\frac{\lambda}{2}$, i raggi dei cerchi che delimitano le zone di Fresnel dipendono dal punto in cui è posto il piano, così le zone avranno raggio massimo nel punto centrale tra i due dispositivi e tali raggi andranno a rimpicciolirsi se

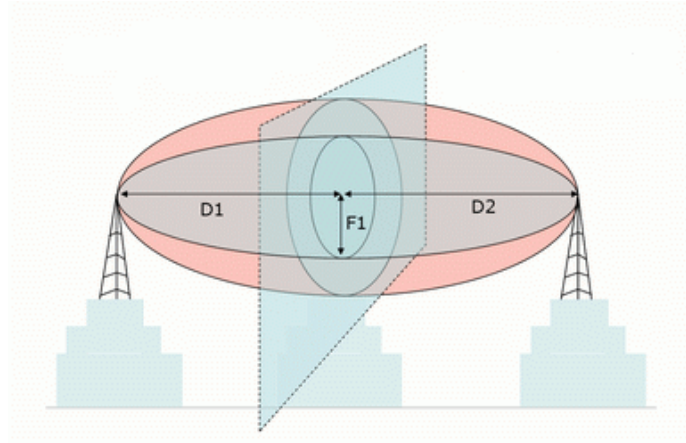


Figura 14: I confini delle zone di Fresnel costituiti da cerchi concentrici nel caso in cui tra le due antenne non sono presenti ostacoli.

il piano è mosso tra trasmettitore e ricevitore.

Ostacolo singolo: modello a lama di coltello

La stima dell'attenuazione del segnale causato da diffrazione per onde radio in un ambiente non ottimale, in presenza per esempio di costruzioni o colline, come modellato in questa tesi, è solitamente difficile da effettuare con precisione. Quando la zona d'ombra in cui si viene a trovare il dispositivo ricevitore è generata da un unico oggetto che si frappone tra ricevitore e trasmettitore, l'attenuazione causata dalla diffrazione può essere stimata considerando l'ostacolo come un piano il cui spessore è minimo.

Questo è il più semplice modello di diffrazione in cui l'attenuazione del segnale causata da un tale fenomeno viene messa in relazione con quanto l'ostacolo invade la prima zona di Fresnel: più l'ostacolo entra nella prima zona di Fresnel e più il segnale arriva al ricevitore attenuato.

Il campo elettrico ricevuto ha una precisa soluzione analitica:

$$E_d = E_0 I(v) = E_0 \frac{1+j}{2} \int_2^\infty e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} t^2} dt \quad (1)$$

dove E_d è il campo elettrico ricevuto, E_0 è il campo elettrico che si avrebbe nello spazio libero e v è il *parametro di diffrazione di Fresnel-Kirchhoff*, pari a:

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

dove

h è la distanza tra la congiungente tra le antenne e l'estremità dell'ostacolo, la distanza h' nella figura 15 è detta *franco*.

d_1 , d_2 sono, rispettivamente, le distanze tra trasmettitore ed ostacolo e tra ostacolo e ricevitore.

λ è la lunghezza d'onda, $\lambda = \frac{c}{f}$

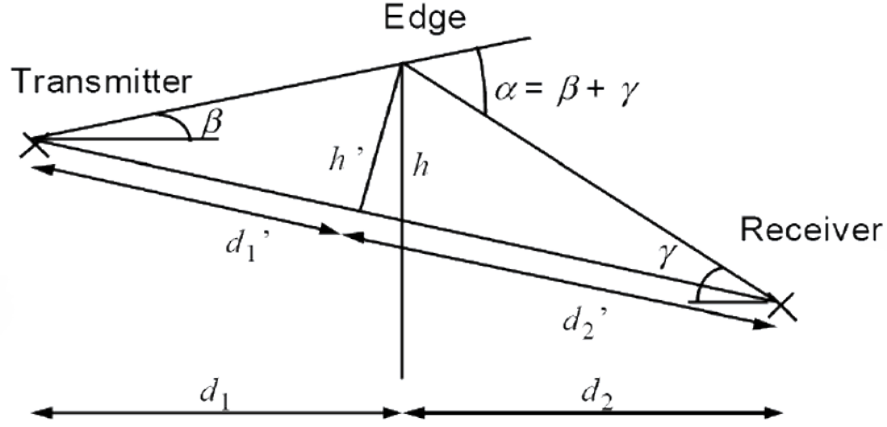


Figura 15: Nell'origine l'ostacolo a lama di coltello con altezza h .

La funzione del parametro di diffrazione nell'equazione 1 è l'integrale complesso di *Fresnel*:

$$I(v) = C(v) - jS(v) \quad (2)$$

con

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi}{2}u^2\right) du$$

$$S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi}{2}u^2\right) du$$

Le funzioni $C(v)$ e $S(v)$ sono dette, rispettivamente, integralcoseno e integralseno, il loro andamento, uno in funzione dell'altro, è rappresentato nella figura 16, nella cosiddetta spirale di *Cornu*: Dai valori asintotici $C(\infty) = S(\infty) = 0.5$ e $C(-\infty) = S(-\infty) = -0.5$, si ottiene, sostituendo nella (1):

$$\mathbf{E}_d = \mathbf{E}_0 \frac{1+j}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(v) \right] + j \left[\frac{1}{2} - S(v) \right] \right\}$$

dalla quale si ottiene la *perdita supplementare per diffrazione*:

$$L_D(\text{dB}) = -20 \log F_D$$

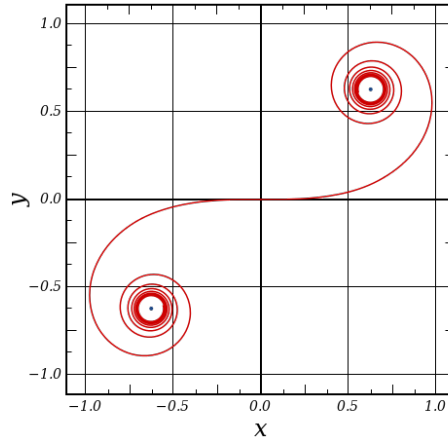


Figura 16: Spirale di Cornu.

Si definisce fattore di diffrazione, F_d , il rapporto tra l'ampiezza del campo ricevuto e quella nello spazio libero:

$$\begin{aligned} F_d &\doteq \left| \frac{E_d}{E_0} \right| = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \left| \frac{1}{2}(1-j) - I(v) \right| = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\left[\frac{1}{2} - C(v) \right]^2 + \left[\frac{1}{2} - S(v) \right]^2} \end{aligned}$$

Nella figura 17 è rappresentato l'andamento di F_d in funzione del parametro di diffrazione v .

Visivamente l'attenuazione per ostacolo singolo è ben descritta nella

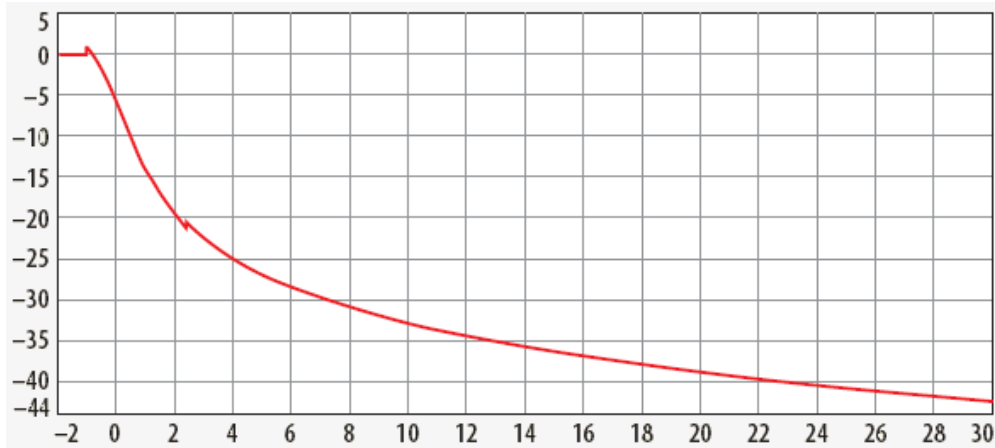


Figura 17: Andamento del fattore di diffrazione in funzione del parametro di diffrazione.

figura 18, il segnale trasmesso incide l'ostacolo, il quale diventa poi nuova sorgente e permette il passaggio del segnale al ricevitore, l'altezza dell'ostacolo può anche essere superiore a quella dell'apparato trasmittente o ricevitore.

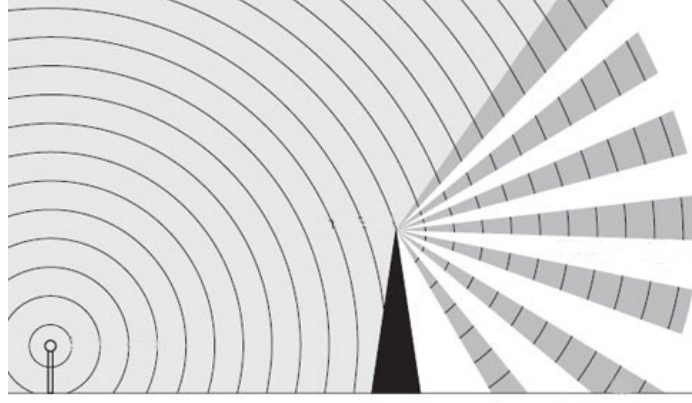


Figura 18: Il segnale si propaga fino all'ostacolo che poi diventa la nuova sorgente.

Ostacolo multiplo: Metodo di Epstein-Peterson

Nel caso di più ostacoli che si interpongono tra trasmettitore e ricevitore, è spesso utilizzato il modello di Epstein-Peterson. Secondo questo modello la distanza tra trasmettitore e ricevitore può essere suddivisa in parti differenti, come mostrato in figura 19 la perdita dovuta alla diffrazione sarà calcolata in base a queste parti. Si procede seguendo più passi:

- l'attenuazione dovuta alla lama di coltello in Q_1 si calcola considerando l'altezza dell'ostruzione relativa alla linea che congiunge l'antenna emittente con l'estremità dell'ostruzione in Q_2 , come se vi fosse collocata l'antenna ricevente. Il parametro di diffrazione di Fresnel-Kirchhoff, v , fornisce:

$$v(Q_1) = (d_1, d_2, h_1 - h_2 \frac{d_1}{d_1 + d_2})$$

si ricava quindi $F_D(v_{Q_1})$

- l'attenuazione dovuta alla lama di coltello in Q_2 si calcola considerando l'altezza dell'ostruzione relativa alla linea, come se in B fosse collocata l'antenna emittente, il parametro v sarà pari a:

$$v(Q_2) = (d_2, d_3, h_2 - h_1 - (-h_2) \frac{d_2}{d_2 + d_3})$$

si ricava quindi $F_D(v_{Q_2})$

L'attenuazione per diffrazione dovuta al contributo dei due ostacoli è pari alla somma (in dB) delle due attenuazioni appena calcolate:

$$L_D = -10 \log F_D(v_{Q_1}) - 10 \log F_D(v_{Q_2})$$

Al crescere della distanza tra gli ostacoli, applicando il metodo di Epstein-Peterson, si ottengono risultati sempre più accurati. Per ostacoli molto vicini, invece, questo tipo di metodo potrebbe non essere molto accurato.

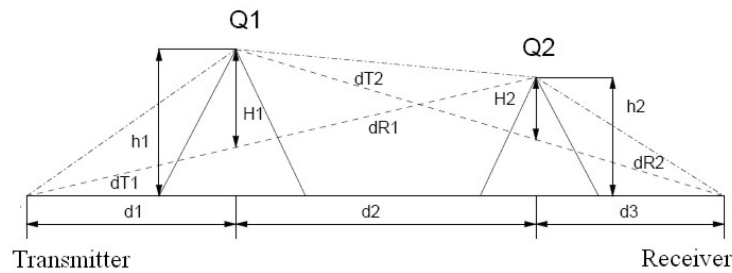


Figura 19: Il segnale si propaga fino all'ostacolo successivo che poi diventa la nuova sorgente, così fino al dispositivo ricevitore.

Bilancio di radiocollegamento

Per bilancio di radiocollegamento, in inglese *Link Budget*, si intende l'insieme dei guadagni e delle perdite dall'apparato trasmettitore, attraverso il mezzo (spazio libero, cavo, fibra, ...), fino all'apparato ricevitore, in un sistema di telecomunicazioni.

Essa rappresenta l'attenuazione dovuta alla propagazione del segnale trasmesso, così come i guadagni di antenna le perdite di linea o di altra natura. I guadagni di canale casualmente variabili come il fading sono presi in considerazione aggiungendo qualche margine a seconda della gravità prevista dei suoi effetti.

Un semplice esempio di equazione di bilancio di radiocollegamento è come questa:

$$\begin{aligned} \text{PotenzaRicevuta[dBm]} &= \text{PotenzaTrasmessa[dBm]} & + \\ &+ \text{Guadagni[dB]} & + \\ &- \text{Perdite[dB]} \end{aligned}$$

Per sistemi **LOS** la prima causa di perdita è la diminuzione della potenza del segnale dovuta alla propagazione uniforme, proporzionale al quadrato inverso della distanza. Nel calcolo della potenza ricevuta si devono considerare alcuni fattori e semplificazioni che rendono il calcolo più agevole:

- Le antenne trasmittenti sono per la maggior parte non isotropiche.
- Antenne omnidirezionali sono molto rare nelle telecomunicazioni, quindi in ogni equazione di bilancio di radiocollegamento si deve considerare il guadagno di antenna.
- Le antenne trasmittenti concentrano la potenza del segnale nella direzione in cui sono rivolte le antenne riceventi.
- Il termine della lunghezza d'onda è spesso considerato parte dell'equazione della perdita nello spazio libero. Questa ridu-

zione di complessità è accettabile per sistemi di comunicazione terrestri, considerando percorsi [LOS](#).

- Si considera la propagazione dell'onda portante indipendente dalla lunghezza d'onda, questo è giustificato legge della conservazione dell'energia, la quale richiede che il campo elettrico diminuisca in potenza come il quadrato della distanza indipendentemente dalla frequenza (nello spazio libero).
- Il cablaggio tra le radio e le antenne può introdurre significative perdite supplementari.
- Effetto doppler induce perdita di potenza nel ricevitore.

Equazione

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{Tx} - L_{FS} - L_M + G_{Rx} - L_{Rx}$$

dove

P_{Rx} è la potenza ricevuta

P_{Tx} è la potenza trasmessa

G_{Tx} è il guadagno dell'antenna

L_{Tx} sono le perdite del trasmettitore

L_{FS} è la perdita nello spazio libero

L_M indica perdite varie (margine di fading, polarizzazione non corrispondente, ...)

G_{Rx} è il guadagno dell'antenna ricevente

L_{Rx} sono le perdite del ricevitore

Margine di radiocollegamento

Per compensare il fenomeno del fading si cerca di aumentare il livello di potenza del segnale in uscita di una quantità detta *margin di fading* M_F in modo da mantenere per tutta la durata del collegamento un sufficiente Signal Noise Ratio ([SNR](#)).

Il valore di M_F necessario a garantire una prefissata affidabilità del collegamento è valutato in base ad analisi teoriche e sperimentali. Per esempio per comunicazioni satellitari, che operano a 10GHz è sufficiente un margine di fading $M_F = 6\text{dB}$.

Per i collegamenti in ponte radio terrestri si suppone che il fading segua una *distribuzione di Rayleigh*, si definisce la disponibilità del collegamento come:

$$D = e^{-\frac{P_{\min}}{P_R}}$$

dove P_{\min} è la potenza minima che il ricevitore è in grado di riconoscere e P_R è la potenza effettivamente ricevuta, il margine di fading si ottiene quindi dalla relazione:

$$(M_F)_{\text{dB}} = -10 \log |\ln D|$$

Tabella 2: Valori caratteristici del margine di radiocollegamento.

Disponibilità D del collegamento (%)	Margine di fading M_F (dB)
90	10
99	20
99.9	30
99.99	40
99.999	50

Nel caso considerato, la somma tra P_{Tx} , G_{Tx} e perdita dei cavi è detta Equivalent Isotropic Radiated Power (**EIRP**) ed è pari a circa 62dBm. Si considera, inoltre, la *sensibilità del ricevitore*, la quale è data dalla somma tra cifra di rumore, rumore termico e Signal to Interference plus Noise Ratio (**SINR**), la somma di questi tre fattori è circa 106.4dBm.

Infine è aggiunto il margine di interferenza, il guadagno dell'antenna ricevente G_{Rx} e il controllo di canale.

Nel simulatore è stata fatta variare la potenza trasmessa per prolungare la durata della batteria del velivolo, l'attenuazione massima in grado di riconoscere il ricevitore è di 163.5dBm per potenza trasmessa di 46dBm, 141.5dBm per 24dBm trasmessi e 137.5dBm per 20dBm trasmessi.

3.3 ANALISI DI COPERTURA DELLA RETE

Una volta modellato il terreno e gli ostacoli come descritto nel capitolo 3.1, si è cercato di analizzare la copertura del sistema **LTE** montata sull'**UAV**.

3.3.1 Calcolo dell'area coperta

L'attenuazione è stata calcolata in ogni pixel valido della mappa, per pixel valido si intende qualsiasi pixel che non rappresenti un ostacolo.

Per ottenere l'attenuazione è stato sviluppato un script Matlab interattivo con quello descritto nel capitolo 3.1, questo programma riceve in *input* i dati della mappa come altezze del terreno, posizione e altezza degli ostacoli e le coordinate e l'altezza dell'**UAV**. Una volta lanciato lo script si otterranno tre matrici delle stesse dimensioni della mappa:

- La prima restituisce l'attenuazione *free space* pixel \times pixel.
- La seconda contiene l'attenuazione *supplementare* dovuta alla presenza di ostacoli.
- La terza è la somma delle prime due e rappresenta l'attenuazione totale pixel \times pixel.

Ostacoli tra elicottero ed utente

L'individuazione di tutti gli ostacoli che si frappongono tra elicottero ed utente, su una linea retta, permette di calcolare la diffrazione del segnale in modo da poter applicare quanto visto nel paragrafo 3.2.1.

Questo tipo di problema si traduce nell'applicazione di concetti di base di geometria. Per prima cosa è stato suddiviso lo spazio in due aree individuate dal valore del coefficiente angolare della retta passante per elicottero ed utente: come mostrato nella figura 20 nelle zone in celeste il coefficiente angolare della retta passante per due punti varia tra -1 e +1 altrimenti la retta passa per la zona arancione. Il sistema di riferimento è centrato sulle coordinate dell'elicottero. Per individuare gli ostacoli che incontrano la retta è stato campiona-

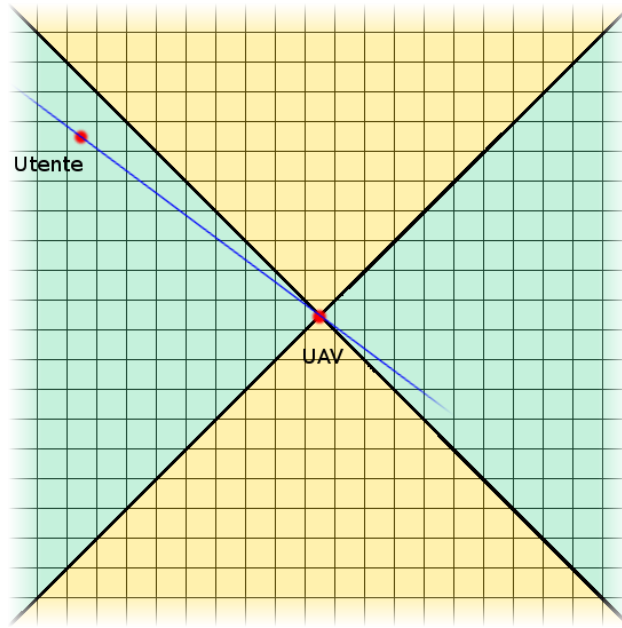


Figura 20: Suddivisione dell'area da analizzare.

to l'asse delle ascisse, o delle ordinate a seconda della zona, in modo da controllare tutti i punti intermedi tra un pixel e l'altro. Come x si prende una lista di valori che va dalla x_e , ascissa dell'elicottero, fino alla x_u , ascissa dell'utente. Da questa lista di coordinate è facile ottenere i rispettivi valori delle ordinate:

$$y = y_u + \frac{y_e - y_u}{x_e - x_u}(x - x_u) \quad (3)$$

dove x e y sono vettori contenenti la lista di coordinate.

La suddivisione in zone è molto importante, se si campionasse solo lungo l'asse delle ascisse, per rette quasi verticali si avrebbero pochi valori da controllare, così invece, è possibile campionare le rette sfruttando tutta la loro lunghezza.

Con questo tipo di approccio si evidenzierà una zona limitrofa alla

retta (regione in giallino), dove sarà necessario controllare la presenza degli ostacoli: Ottenute tutti i pixel per cui passa la retta, si deve

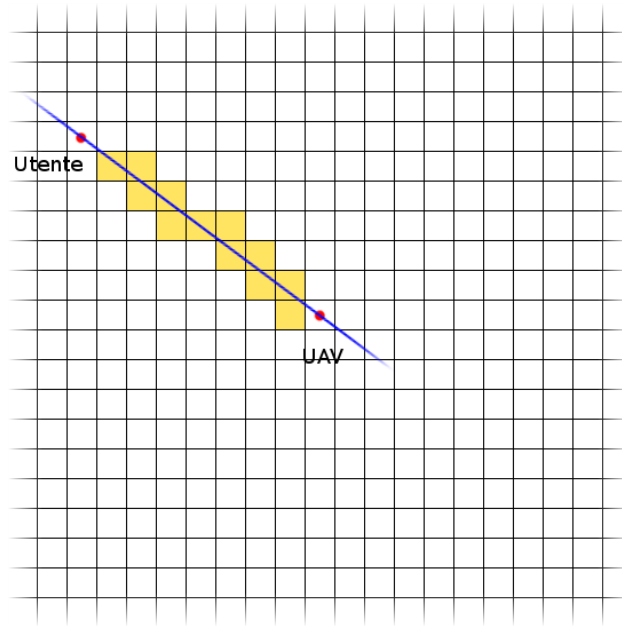


Figura 21: Pixel passanti per la retta.

prendere la parte intera di ogni coordinata per ottenere il pixel corrispondente; a questo punto si deve controllare se ogni pixel faccia parte di un ostacolo: si prende la maschera degli ostacoli (12) e si controlla se il pixel appartenga o meno all'ostacolo.

Evidenziati gli ostacoli dall'area in giallino della figura 21 è necessario distinguere gli ostacoli in base alla loro altezza; il modello di Epstein-Peterson, infatti, permette di modellare un ostacolo come se fosse una lama di coltello, quindi se più pixel vicini hanno la stessa altezza faranno parte dello stesso ostacolo e nella lista degli ostacoli tra elicottero ed utente dovranno essere considerati come uno solo. Il modello di Epstein-Peterson sulla diffrazione dovuta ad ostacoli multipli è definito su una retta, l'area in giallino, invece, definisce una zona limitrofa alla retta tra elicottero ed utente: si devono quindi proiettare le coordinate degli ostacoli sulla retta.

Per implementare ed automatizzare la proiezione del pixel sulla retta sono stati utilizzati dei semplici concetti di geometria analitica; dati tre punti, coordinate dell'elicottero, coordinate dell'utente e coordinate dell'ostacolo si devono calcolare le coordinate della proiezione in funzione di questi tre punti:

$$E = (x_e, y_e)$$

$$U = (x_u, y_u)$$

$$O = (x_o, y_o)$$

Si considera la retta (3) passante per E ed U, la perpendicolare passante per O avrà equazione:

$$y = y_o - \frac{x_e - x_u}{y_e - y_u}(x - x_o) \quad (4)$$

L'intersezione della retta 3 con la 4, mi darà le coordinate della proiezione dell'ostacolo sulla retta, i punti in verde nell'immagine 22.

$$x = \frac{(y_o - y_e)(y_u - y_e)(x_u - x_e) + x_o(x_u - x_e)^2 + x_e(y_u - y_e)^2}{(y_u - y_e)^2 + (x_u - x_e)^2}$$

$$y = y_e + (y_u - y_e) \frac{(y_o - y_e)(y_u - y_e) + (x_o - x_e)(x_u - x_e)}{(y_u - y_e)^2 + (x_u - x_e)^2}$$

Dopo aver calcolato la proiezione di ogni ostacolo sulla retta si ot-

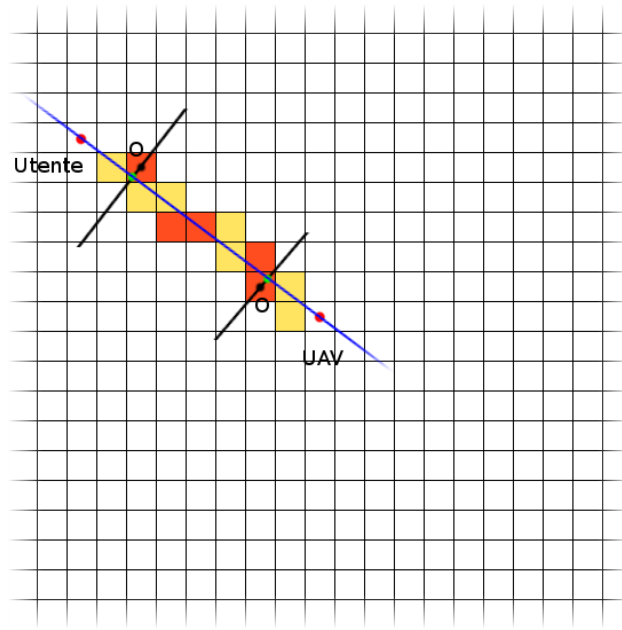


Figura 22: Proiezioni degli ostacoli sulla retta.

tiene una lista di ostacoli tra elicottero ed utente, adesso è possibile applicare il modello di Epstein-Peterson per calcolare l'attenuazione dovuta alla diffrazione.

Parametro di diffrazione

Il modello di Epstein-Peterson si riduce a calcolare l'attenuazione dovuta ad un singolo ostacolo ed a replicare il calcolo ostacolo per ostacolo, Quindi il problema del calcolo della diffrazione per ostacolo multiplo può essere semplificato al calcolo per ostacolo singolo. Partendo quindi dalla lista di ostacoli tra elicottero ed utente si calcola la distanza tra elicottero e primo ostacolo e tra ostacolo ed utente, infine si calcola il franco e si applica la formula ?? per ottenere il parametro di diffrazione.

Attenuazione dovuta alla diffrazione

Il calcolo dell'attenuazione pixel \times pixel è quasi terminato, adesso si ha per ogni pixel il parametro di diffrazione dovuto agli ostacoli che si frappongono tra elicottero ed utente.

Il parametro di diffrazione permette di calcolare le due funzioni integralcoseno ed integralseno, le quali sottratte tra loro restituiscono l'integrale complesso di Fresnel (2). Quest'ultimo valore permette di ottenere il fattore di diffrazione v , il quale, calcolato in dB, dà l'attenuazione nel determinato pixel.

Ripetendo il processo per ogni pixel della matrice, si otterranno le matrici con l'attenuazione (free space, supplementare e totale) calcolata per ogni pixel.

Calcolo del raggio di copertura

Il calcolo del raggio di copertura permette di evidenziare l'area coperta dal segnale trasmesso dall'UAV, in base all'attenuazione massima tollerabile dal ricevitore.

Per il calcolo dell'attenuazione è stata seguita la procedura descritta nel capitolo 3.2.1, una volta ottenuta questa soglia si procede a confrontarla con l'attenuazione calcolata in ogni pixel, se quest'ultima è superiore allora si suppone che quel pixel non sia coperto dal segnale trasmesso dall'UAV. A questo punto il calcolo del raggio si semplifica in una semplice distanza tra due punti: Il raggio viene quindi

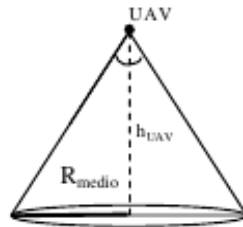


Figura 23: Il raggio è la distanza sul piano tra UAV ed utente coperto da segnale.

calcolato per ogni punto coperto, il risultato è una matrice contenente le distanze tra elicottero ed utente.

Una volta calcolato il raggio di copertura pixel \times pixel è possibile calcolare il raggio medio di copertura come la media aritmetica tra i raggi ottenuti, così facendo si otterrà un'area circolare dove la maggior parte del segnale sarà concentrato.

Oltre al raggio medio di copertura, un indice più veritiero della copertura totale del segnale è dato dai percentili del raggio di copertura; presi tutti i raggi punto per punto è stato calcolato l'80° percentile in

modo da rappresentare il raggio che contiene l'80% dell'area coperta da segnale.

Miglioramento di copertura dell'area

Al fine di migliorare i settori esclusi dai calcoli precedenti, dove l'attenuazione del segnale è superiore alla massima consentita, sarà possibile proseguire secondo due approcci: la variazione della posizione degli UAV e l'utilizzo di più UAV. La prima possibilità prevede di far seguire ad un UAV un loop sull'area da coprire, in modo da offrire, anche se per una durata limitata, ad ogni utente il segnale per poter comunicare nell'area.

Con la seconda possibilità si coordineranno più UAV a formare una rete a maglie, la cosiddetta rete *mesh*, in modo da poter coprire un'area molto più estesa.

Le due possibilità, ovviamente, potrebbero anche coesistere a seconda delle esigenze dei soccorritori, come per esempio per l'espansione dell'area, il numero di UAV a disposizione, ...

4 | RISULTATI

In questo lavoro di tesi sono stati simulati tre scenari, relativi a tre diverse zone di Roma:

1. Il territorio attorno alle facoltà di Ingegneria, Economia e Lettere dell'Università di Roma Tor Vergata.
2. La zona tra la stazione di Roma Termini e il Colosseo.
3. L'area con al centro il Pantheon.

Sono state scelte queste tre aree perché presentano una morfologia particolare, partendo dalla zona dell'Università fino a quella del Pantheon si può vedere come l'area urbana e la densità di edifici aumenti. Anche le aree verdi passano dalla zona attorno all'Università, al Parco Del Colle Oppio, fino alla zona del Pantheon piena di edifici.

In tutte le simulazioni l'**UAV** è stato posto al centro dell'area e l'antenna trasmittente è stata supposta un dipolo omnidirezionale.

Durante le simulazioni è stata fatta variare la potenza trasmessa dall'apparato **LTE** dell'**UAV** per fare in modo di gestire un eventuale risparmio energetico al fine di prolungare la durata della batteria del velivolo.

Si ricorda che ogni area ha una superficie di 1km^2 con una risoluzione di $200 \times 200\text{pixel}$. Per ognuna di queste tre zone sono stati calcolati questi parametri:

- Attenuazione totale, calcolata $\text{pixel} \times \text{pixel}$.
- Raggio medio di copertura.
- Raggio medio all'80° percentile.

CONFRONTO TRA LE TRE ZONE

Nella tabella 3 sono rappresentati i raggi di copertura per ogni zona al variare della potenza, a potenza massima è molto evidente come il raggio diminuisca con l'aumento della densità urbana.

Tabella 3: Raggi di copertura nelle tre zone al variare della potenza trasmessa.

	Ptx = 46dBm	Ptx = 24dBm	Ptx = 20dBm
Zona 1	506.1867 m	504.2321 m	503.3140 m
Zona 2	490 m	392.0459 m	365.2773 m
Zona 3	473.0486 m	408.0747 m	371.9339 m

4.1 AREA FACOLTÀ DI INGEGNERIA, ECONOMIA E LETTERE

L'area attorno alle facoltà di Ingegneria, Economia e Lettere dell'Università di Roma Tor Vergata, sono libere da ostacoli. Gli unici edifici presenti sono quelli dei dipartimenti di Ingegneria (Ingegneria dell'Informazione, Ingegneria Industriale ed Ingegneria Civile), gli edifici delle facoltà di Lettere e di Economia. Il resto, tra parcheggi ed aree verdi, è tutto spazio libero disponibile per l'utente, ci si aspetta quindi che l'area coperta dal segnale sia la maggior parte se non tutta quanta.

Dai calcoli del raggio si ottiene che l'area coperta è circa il 80% di quella totale, ma dato che i calcoli si basano sul calcolo dell'80° percentile, risulta che è coperto il 100% dell'area. L'area coperta diminuisce di poco anche a potenza minima.

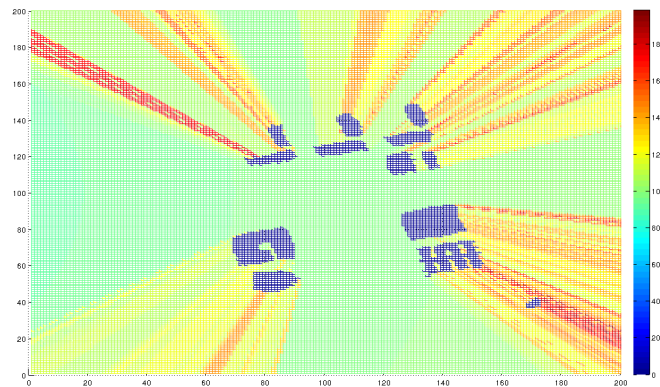


Figura 24: Attenuazione nella zona delle facoltà di Ingegneria, Economia e Lettere dell'Università di Roma Tor Vergata con potenza trasmessa pari a 46dBm.

Il raggio medio è pari a 388.3664m.

Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 506.1867m.

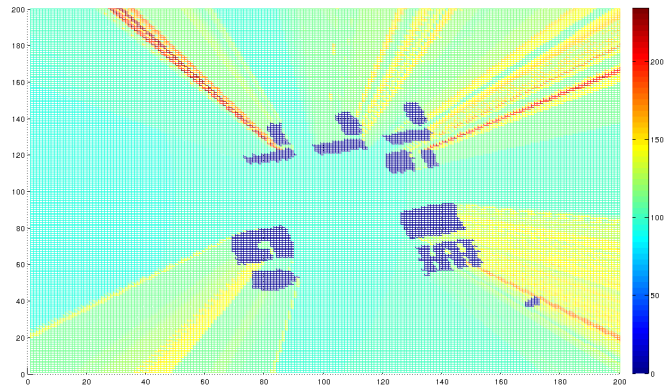


Figura 25: Attenuazione nella zona delle facoltà di Ingegneria, Economia e Lettere dell'Università di Roma Tor Vergata con potenza trasmessa pari a 24dBm.

Il raggio medio è pari a 386.0185m.

Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 504.2321m.

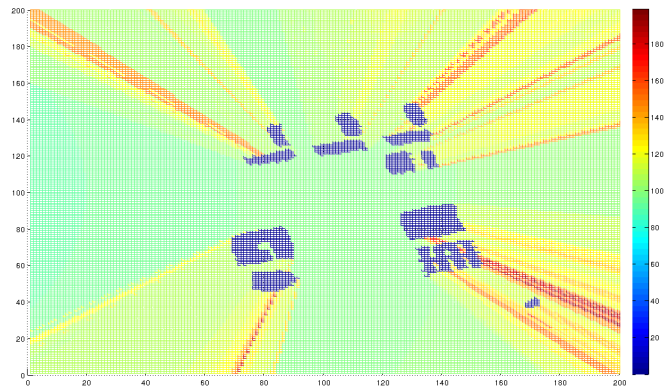


Figura 26: Attenuazione nella zona delle facoltà di Ingegneria, Economia e Lettere dell'Università di Roma Tor Vergata con potenza trasmessa pari a 20dBm.

Il raggio medio è pari a 384.704m.

Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 503.3140m.

4.2 AREA TRA ROMA TERMINI E COLOSSEO

Nella zona tra la stazione di Roma Termini e il Colosseo l'ambiente è una via di mezzo tra urbano e spazio libero, si va dal Parco Del Colle Oppio fino alla zona urbana attorno a Roma Termini. Con la massima potenza trasmessa si riesce a coprire il 75% dell'area, quindi sempre riferendosi al percentile 80 si capisce che la copertura è quasi totale, a potenza minima, invece, la copertura scende al 40% quindi l'area coperta è circa il 50%.

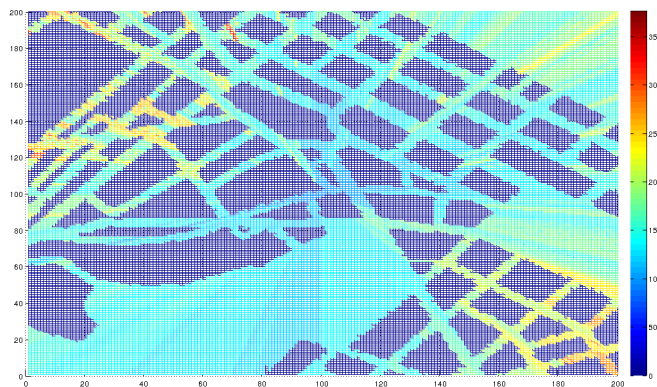


Figura 27: Attenuazione nella zona tra Colle Oppio e Roma Termini con potenza trasmessa pari a 46dBm.
 Il raggio medio è pari a 363.9597m.
 Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 490m.

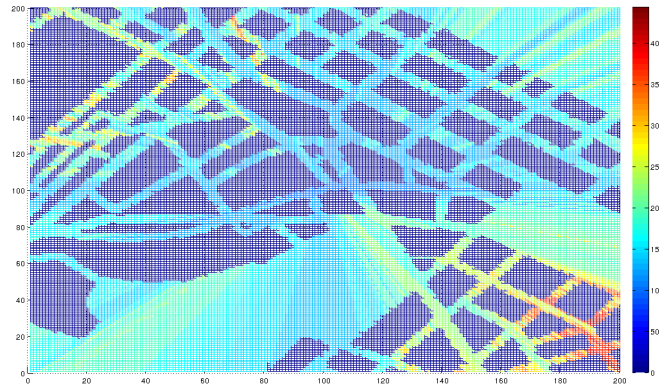


Figura 28: Attenuazione nella zona tra Colle Oppio e Roma Termini con potenza trasmessa pari a 24dBm.
 Il raggio medio è pari a 282.0619m.
 Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 392.0459m.

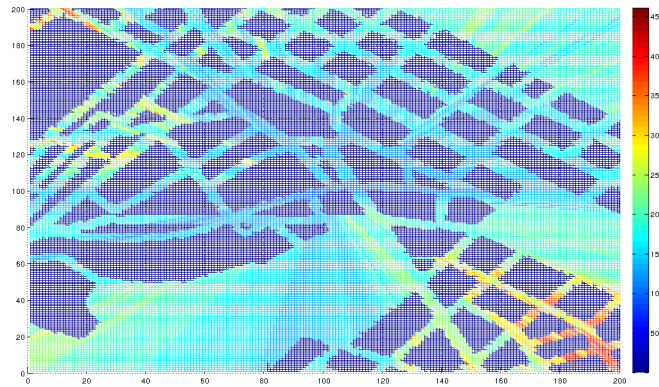


Figura 29: Attenuazione nella zona tra Colle Oppio e Roma Termini con potenza trasmessa pari a 20dBm.
 Il raggio medio è pari a 256.2801m.
 Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 365.2773m.

4.3 AREA PANTHEON

Nell'area urbana dove è ubicato il Pantheon, l'ambiente urbano è predominante è quello urbano, non ci sono aree libere e l'utente può trovarsi solo lungo le strade.

A potenza massima il raggio all'80° percentile copre un'area pari al 70%, normalizzando si ottiene che l'area coperta è circa l'87%, al diminuire della potenza l'area normalizzata coperta arriva a circa un 55%

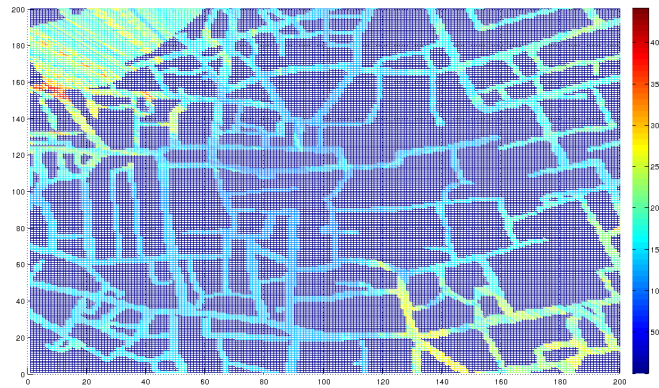


Figura 30: Attenuazione nell'area del Pantheon con potenza trasmessa pari a 46dBm.

Il raggio medio è pari a 348.2113m.

Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 473.0486m.

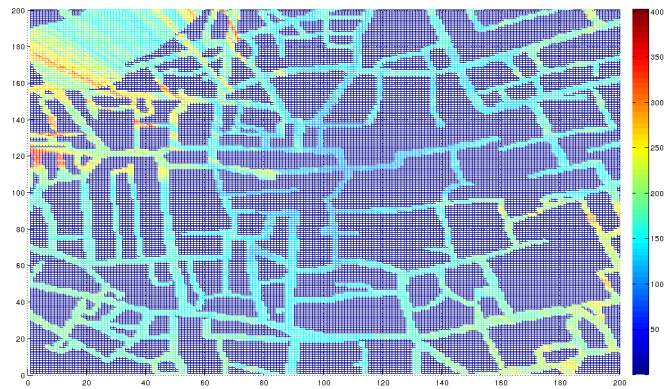


Figura 31: Attenuazione nell'area del Pantheon con potenza trasmessa pari a 24dBm.

Il raggio medio è pari a 294.3916m.

Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 408.0747m.

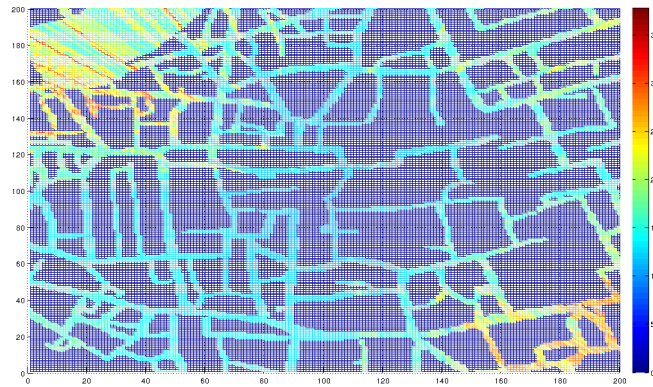


Figura 32: Attenuazione nell'area del Pantheon con potenza trasmessa pari a 20dBm.

Il raggio medio è pari a 242.1427m.

Il raggio medio calcolato all'80° percentile è di 371.9339m.

BIBLIOGRAFIA

3rd Generation Partnership Project

2012 *LTE*, <http://www.3gpp.org/>.

ArtizaNetworks

2012 (a cura di) *LTE Resources*, <http://www.artizanetworks.com/>.

Google Developers

2012 *Static Maps API V2 Developer Guide*, <https://developers.google.com/maps/documentation/staticmaps/>.

GPS Visualizer

2012 *Elevations with GPS Visualizer*, <http://www.gpsvisualizer.com/elevation>.

Guzzon, Elena

2011 "Long Term Evolution".

H.Holma, A.Toskala

2009 *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access*, a cura di John Wiley e Sons.

2010 *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*, a cura di John Wiley e Sons.

Ministero dello sviluppo economico

2011 *Pubblicazione bando di gara per l'assegnazione di diritti d'uso di frequenze nelle bande 800, 1800, 2000, 2600 MHz*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Dipartimento per le Comunicazioni.

Molinari, Maurizio

2011 "Droni Usa per osservare i reattori", *LASTAMPA*, <http://www.lastampa.it/>.

Puff, Jarno

2006 "Micro seminari di aggiornamento nell'ambito delle iniziative attivate dalle scuole della rete ENIS Italia", in *Robotica e nuove strategie per l'apprendimento*, a cura di A2TECH.

SABAerospace

2012 *UAV Program*, <http://www.sabaerospace.it/>.

The UAV

2012 "The UAV - Unmanned Aerial Vehicle", <http://www.theuav.com/>.