POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria delle telecomunicazioni

Tesi di Laurea

Sistema di telecomando e telemetria per aerei stratosferici senza pilota: definizione delle specifiche e validazione tramite simulazione

Relatori:
Prof. Mario PENT
Prof. Marina MONDIN
Ing. Fabio DOVIS

Candidati:
Francesco BAIETTO
Maurizio FODRINI
Maurizio SISTO

Dicembre 2000

Contributi dei candidati

Questa tesi è stata realizzata mediante una stretta collaborazione ed una costante cooperazione tra i candidati. Tutte le problematiche affrontate sono state esaminate singolarmente, suddividendole opportunamente per consentire un'analisi parallela dei relativi aspetti da studiare. I risultati così ottenuti sono poi stati analizzati e confrontati per decidere la strategia più adatta a risolvere tali problematiche, in modo da disporre di una base di partenza con cui impostare il problema successivo. In particolare, il contributo fornito da ciascun tesista per lo studio dei vari argomenti è stato il seguente:

- *Baietto*: analisi del modello di telemetria proposto dal CCSDS e del flusso dati in down-link, realizzazione del modello di canale, teoria della modulazione OFDM, realizzazione e simulazione dello schema DOFDM, teoria e simulazione dei codici a blocco, valutazione delle prestazioni del codice di Reed-Solomon, scansione elettronica delle schiere, antenne ad elica, valutazione del margine disponibile.

- *Fodrini*: analisi dei servizi di telemetria proposti dal CCSDS, trattazione teorica del modello del canale, teoria e simulazione della modulazione GMSK, realizzazione dello schema DOFDM, teoria e simulazione dei codici convoluzionali, valutazione dei ritardi complessivi del sistema, schiera ottenuta mediante sintesi FTM e antenna a dipoli incrociati, valutazione del link-budget per le diverse situazioni di volo.

- *Sisto*: analisi del modello di telecomando proposto dal CCSDS, analisi del flusso dati in up-link, teoria e simulazione delle modulazioni DQPSK e $\pi/4$ DQPSK, teoria e valutazione delle prestazioni fornite dal protocollo ARQ, analisi della correlazione tra i bit, schiere di tipo lineare con distribuzione uniforme, a coseno e a coseno quadrato, studio dei parametri riguardanti il calcolo del link-budget.

Ringraziamenti

Esprimiamo i nostri ringraziamenti al prof. Mario PENT e alla prof.ssa Marina MONDIN per il supporto fornitoci durante lo svolgimento di questa tesi e, in modo particolare, all'ing. Fabio DOVIS per la sua assistenza e costante disponibilità presentata nei nostri confronti.

Siamo grati, inoltre, all'ing Gabriella POVERO per la sua consulenza in merito al simulatore utilizzato, nonché ai docenti dei Dipartimenti di ingegneria Aeronautica e Spaziale, di Energetica e di Elettrica Industriale per le informazioni che gentilmente ci hanno fornito, relativamente al flusso dati.

Desideriamo anche ringraziare il tesista Roberto FANTINI per il suo contributo apportato nello studio del canale di propagazione.

Porgiamo, poi, la più sentita riconoscenza in modo particolare ai nostri rispettivi genitori, Lorenzo e Cesira BAIETTO, Italo e Maria Rosa FODRINI, Ugo e Michela SISTO, per la loro costante presenza ed il loro continuo supporto manifestatoci durante tutti questi anni.

Esprimiamo infine i nostri ringraziamenti a tutti gli amici e a quelle persone che hanno creduto nelle nostre capacità.

Indice

Capitolo 1

Introduzione

La realizzabilità di piattaforme aeree per operazioni di lunga durata ad elevate altitudini è stata dimostrata in diversi progetti quali, ad esempio, Solar Challenger, Icare e Pathfinder. Il progresso nella tecnologia aerospaziale ha poritato ad un notevole interesse per questo tipo di piattaforme dette HALE (*High Altitude Long Endurance*), soprattutto per il ruolo che esse potrebbero giocare nel settore delle telecomunicazioni, simile a quello dei satelliti artificiali, ma con un maggior vantaggio rispetto ad essi dovuto ad un minor costo, un'elevata adattabilità a molti tipi di applicazioni, una maggiore vicinanza al suolo e un posizionamento su richiesta. Al momento sono stati presentati alla comunità scientifica internazionale molti progetti sulle piattaforme stratosferiche HALE (attorno ai $15 \div 30$ km di quota) alimentate con celle solari o tramite un collegamento a microonde. In accordo con questo tipo di progetti, al Politecnico di Torino è in fase di progetto una piattaforma stratosferica senza pilota e con alimentazione tramite celle solari. Questa piattaforma, denominata HELIPLAT (*HELIos PLATform*), è in grado di essere equipaggiata con una serie di *payload* del peso totale di circa 100 kg e di offrire una potenza a bordo di qualche centinaia di watt (circa $500 \div 800$ W); la quota di volo è compresa tra i 17 e i 20 km con un raggio di copertura a terra di circa 40 km. Il progetto è finanziato dall'ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*) e dalla *Commissione Europea* attraverso il programma che prevede lo sviluppo di una rete di piattaforme stratosferiche per applicazioni di telecomunicazione, sorveglianza ambientale e localizzazione. Nel prossimo futuro si prevede una rapida diffusione di questo tipo di piattaforme per applicazioni civili, non appena la tecnologia aeronautica sarà in grado di produrle a costi ridotti.

La piattaforma Heliplat è in grado di poter supportare una grande varietà di servizi; nel seguito verranno elencati i più importanti:

- *Servizi di telefonia cellulare*: la piattaforma può svolgere la funzione di stazione radio-base sia per il sistema GSM (*Global System for Mobile communications*) standard che per il futuro sistema cellulare di terza generazione (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*). L'uso della piattaforma come stazione radiobase permette di fornire i servizi di telefonia cellulare nelle aree rurali con bassa densità di popolazione o per incrementare la capacità della rete telefonica nelle situazioni di emergenza.

- *Servizi a larga banda*: l'utilizzo della piattaforma Heliplat viene visto come una possibile soluzione per portare i servizi a larga banda (applicazioni video, Internet, ...) nei paesi in via di sviluppo, nei quali mancano le infrastrutture per le telecomunicazioni. Negli altri paesi, invece, Heliplat può essere utilizzato come integrazione ai servizi di telecomunicazione pre-esistenti (sistemi di comunicazione senza cavo di presente e futura generazione) e nel contesto di studi di fattibilità nell'utilizzo di una rete Helinet in grado di fornire servizi di distribuzione punto-multipunto. In seguito al particolare posizionamento e con un'opportuna scelta della frequenza, una singola piattaforma è in grado di offrire una copertura su un'area maggiore rispetto ad una stazione terrestre.

- *Collegamento tra telefonia cellulare e sistemi di video-sorveglianza*: i sistemi di telesorvegianza possono essere collegati con i servizi di telefonia cellulare allocando, ad esempio, uno o più canali GSM per la trasmissione di immagini a terra. Questo tipo di servizio può essere offerto come un elemento ausiliare al normale servizio telefonico; tuttavia occorre ancora risolvere alcuni problemi legati alla trasmissione di immagini con un rate fissato, in un formato compatibile con quello del GSM, e alla realizzazione di algoritmi di compressione delle immagini in modo da ottenere la compatibilità richiesta.

- *Servizi di sorveglianza interattiva*: un importante servizio di video-sorveglianza riguarda il riconoscimento di oggetti con una data forma dipendente dalla loro applicazione (edifici, foreste in fiamme, branchi di animali, ecc.). L'identificazione di un particolare oggetto richiede l'uso di tecniche di compressione selettive basate su di una trasmissione affidabile delle immagini degli oggetti desiderati. Può anche essere progettato un sevizio di sorveglianza interattiva e intelligente, cioè che renda possibile la selezione di oggetti da una raccolta di possibili forme o l'ingrandimento di particolari porzioni delle immagini desiderate. Questo sistema intelligente dovrebbe anche permettere la trasmissione con differenti rapporti di compressione per le diverse parti dell'immagine, facendo uso di un'allocazione dinamica del bit rate tra le applicazioni vocali e quelle di video-sorveglianza.

- *Servizi di localizzazione di utenti mobili*: se la piattaforma viene utilizzata come stazione base per la telefonia cellulare, essa può anche fornire servizi di localizzazione di utenti mobili. Se i dati di localizzazione vengono trasmessi a terra sfruttando il normale canale GSM, la localizzazione può essere vista come un servizio ausiliare del sistema di telefonia cellulare. La localizzazione dell'utente mobile può essere ottenuta correlando la quota della piattaforma, la direzione di arrivo del segnale ed infine la distanza radiale tra l'utente e la piattaforma. Sotto adeguate ipotesi, la localizzazione può essere ottenuta utilizzando una piattaforma aerea come la sola stazione di base a cui fanno riferimento tutte le misure.
  Un secondo utilizzo della piattaforma nei servizi di localizzazione riguarda il suo possibile uso come parte attiva di un sistema di navigazione come il GPS (*Global Position System*) o il GNSS2/Galileo (*Global Navigation Satellite System*), attualmente ancora in fase di sviluppo. Esistono due possibili strategie: la prima prevede l'utilizzo della piattaforma come trasponder per segnali GPS, mentre la seconda come pseudo-satellite in volo, con i propri parametri relativi alle effemeridi.

Altre possibili applicazioni di Heliplat riguardano il monitoraggio del traffico, in particolare la localizzazione di veicoli tramite i sistemi di navigazione, il supporto per il traffico dei mezzi pubblici, dei taxi e delle imbarcazioni nelle acque costiere, il controllo del traffico urbano e della rete ferroviaria ed infine l'identificazione automatica dei veicoli.

Il sistema proposto, con una piattaforma in movimento che comunica con gli utenti, presenta delle caratteristiche intrinseche intermedie tra i sistemi terrestri e quelli satellitari in termini di livelli di potenza richiesti, ritardi di propagazione, spettro Doppler del canale, ecc.; ad esempio, i metodi di codifica e decodifica che non possono essere applicati ai sistemi satellitari, a causa degli eccessivi ritardi di propagazione, o ai sistemi terrestri, a causa della mancanza del raggio diretto tra trasmettitore e ricevitore, potrebbero risultare adatti in un sistema HALE.

Lo scopo del lavoro di questa tesi è quello di definire le specifiche del sistema di telecomando e telemetria di Heliplat sia per quanto riguarda gli apparati di bordo sia per quelli di terra, in termini di caratteristiche di modulazione e codifica, di link-budget e di antenne. In particolar modo nel capitolo 2 verranno presi in considerazione gli standard utilizzati per le missioni spaziali, con particolare riferimento ai sistemi satellitari, valutando poi quali di essi potranno essere utilizzati per Heliplat. Nel capitolo 3, invece, verrà effettuata un'analisi dell'intero flusso dati da trasmettere in up-link (telecomando) e in down-link (telemetria), in modo da poter ottenere una stima del bit rate da utilizzare. Lo studio del modello del canale di propagazione, con particolare attenzione agli effetti prodotti dal Doppler e dai cammini multipli verrà presentato nel capitolo 4; inoltre, verrà introdotto il modello di canale utilizzato nelle simulazioni riguardanti il sistema di modulazione e le prestazioni. Nel capitolo 5 verranno poi esposte le basi teoriche relative agli schemi di modulazione, i quali saranno confrontati nel capitolo successivo. In quest'ultimo (capitolo 6), utilizzando il modello di canale precedentemente illustrato, verranno validati per via simulativa i diversi schemi di modulazione già illustrati dal punto di vista teorico; da questi confronti si determinerà la modulazione in grado di fornire le migliori prestazioni. I valori di probabilità d'errore così ottenuti, però, non saranno sicuramente sufficienti a fornire un grado di affidabilità adeguato. Perciò, dopo aver analizzato i principi teorici delle tecniche di codifica (capitolo 7), nel capitolo 8 si effettueranno le simulazioni necessarie per valutare il miglioramento delle prestazioni richiesto. Per completare l'analisi dal punto di vista trasmissivo, nel capitolo 9 verrà presentato uno studio di fattibilità riguardante le antenne di terra e di bordo, proponendo diversi tipi di soluzioni. Infine, con i valori di guadagno di antenna ricavati, nel capitolo 10 verranno effettuati i calcoli relativi al link-budget; essi saranno necessari per verificare che la potenza di trasmissione minima, che consente di ottenere le prestazioni analizzate in presenza delle tecniche di codifica, non risulti eccessiva, data la scarsa disponibilità a bordo.

Bibliografia

[1] *Telecommand: Summary of Concept and Rationale*, Report CCSDS 200.0-G-6, Green Book, Issue 6, Washington D.C., January, 1987, http://www.ccsds.org/all_books.html#telecommand

[2] *Telecommand, Part 1: Channel Service*, Recommendation CCSDS 201.0-B-3, Blue Book, Issue 3, Washington D.C., June, 2000, http://www.ccsds.org/all_books.html#telecommand

[3] *Telecommand, Part 2: Data Routing Service*, Recommendation CCSDS 202.0-B-2, Blue Book, Issue 2, Washington D.C., November, 1998, http://www.ccsds.org/all_books.html#telecommand

[4] *Telecommand, Part 2.1: Command Operation Procedures*, Recommendation CCSDS 202.1-B-1, Blue Book, Issue 1, Washington D.C., October, 1991, http://www.ccsds.org/all_books.html#telecommand

[5] *Telecommand, Part 3: Data Management Service*, Recommendation CCSDS 203.0-B-1, Blue Book, Issue 1, Washington D.C., January, 1987, http://www.ccsds.org/all_books.html#telecommand

[6] *Telemetry: Summary of Concept and Rationale*, Report CCSDS 100.0-G-1, Green Book, Issue 1, Washington D.C., December, 1987, http://www.ccsds.org/all_books.html#telemetry

[7] *Telemetry Channel Coding*, Recommendation CCSDS 101.0-B-3, Blue Book, Issue 3, Washington D.C., May, 1992,

http://www.ccsds.org/all_books.html#telemetry

[8] *Packet Telemetry*, Recommendation CCSDS 102.0-B-2, Blue Book, Issue 2, Washington D.C., January, 1987, http://www.ccsds.org/all_books.html#telemetry

[9] *Packet Telemetry Services*, Recommendation CCSDS 103.0-B-1, Blue Book, Issue 1, Washington D.C., May, 1996, http://www.ccsds.org/all_books.html#telemetry

[10] A. Lausetti, F. Filippi, *Elementi di meccanica del volo*, Levrotto & Bella, Torino, Italy, 1956

[11] R. Foschini, *Nozioni di aerodinamica e meccanica del volo*, Esculapio, Bologna, Italy, 1980

[12] A. Leich, *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1990

[13] F. Crosilla, L. Mussio, *Il sistema di posizionamento globale satellitare GPS*, CISM, Udine, Italy, 1991

[14] T. Logsdon, *Understanding the Navstar: GPS, GIS, and IVHS*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 1995

[15] S. Focardi, I. Massa, U. Uguzzoni *Fisica generale: meccanica e termodinamica*, Ambrosiana, Milano, Italy, 1999

[16] R. Noyes, *Fuel cells for public utility and industrial power*, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, USA, 1977

[17] W. Mitchell jr., *Fuel Cells*, Accademic Press, New York, USA, 1963

[18] C. Hu, R. M. White *Solar Cells from basic to advanced systems*, McGraw Hill, New York, USA, 1983

[19] M. Sittig, *Solar cells for photovoltaic generation of elettricity: materials, devices and application*, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, USA, 1979

[20] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, Prentice Hall International Editions, New Jersey, USA, 1996

[21] W. C. Jakes jr., *Microwave mobile communications*, John Wiley & Sons, North Andover, Massachusetts, USA, 1974

[22] L. J. Cimini jr., *Analysis and simulation of digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 33, No. 7, July, 1985

[23] M. Alard, R. Lassalle, *Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers*, EBU Review, Tech. No. 224, August, 1987

[24] L. Lo Presti, F. Neri, *L'analisi dei segnali*, 2nd ed., C.L.U.T., Torino, Italy, 1992

[25] S. Benedetto, E. Biglieri, *Trasmission with wireless applications*, Plenum, 1998

[26] A. Baciotti, F. Ricci, *Analisi matematica volume I*, Liguori editore, Napoli, Italia, Ottobre, 1994

[27] J. G. Proakis, M. Salehi, *Communication systems engineering*, Prentice Hall International Editions, New Jersey, USA, 1994

[28] J. Saltz, S. B. Weinstein, *Fourier transform communication system*, presented at the Ass. Comput. Machinary Conference Computers and Communication, Pine Mountains, October, 1969

[29] S. Benedetto, E. Biglieri, V. Castellani, *Digital transmission theory*, Prentice Hall International Editions, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1987

[30] F. Fagnola, G. Pistone, *Primo semestre di probabilità* , C.L.U.T., Torino, Italy, 1996

[31] P. A. Laurent, *Exact and approximate construction of digital phase modulations by superposition of amplitude modulated pulse (AMP)*, IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-34, No. 2, February, 1986

[32] K. Kuchi, V. K. Prabhu, *Power spectral density of GMSK modulation using matrix methods*, IEEE Military Communications Conference Proceedings, Vol. 1, 1999

[33] K. Kuchi, V. K. Prabhu, *Spectral occupancy and error rate considerations of coherent GMSK*, IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Vol. 3, 1999

[34] A. Linz, A. Hendrickson, *Efficient implementation of an I-Q GMSK modulator*, IEEE Transactions on Circuit and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, Vol. 43, Issue 1, January, 1999

[35] K. Murota, K. Hirade, *GMSK modulation for digital mobile radio telephony*, IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-29, No. 7, July, 1981

[36] *TOPSIM IV: user manual*, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 1993

[37] L. Lo Presti, M. Mondin, *Design of optimal FIR raised cosine filter*,

Electronics Letters, Vol. 25, No. 7, March, 1989

[38] G. David Forney jr., *Concatenated codes*, M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1966

[39] W. W. Peterson, *Error correcting codes*, M.I.T. Press and John Wiley & Sons, New York, USA, 1961

[40] S. B. Wicker, V. K. Bhargava, *Reed-Solomon codes and their application*, IEEE Press, New York, USA, 1994

[41] R. E. Blahut, *Theory and practice of error control codes*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, USA, 1983

[42] G. C. Clark jr., J. B. Cain, *Error-correction coding for digital communications*, Plenum, New York, USA, 1981

[43] A. Dholakia, *Introduction to convolutional codes with applications*, Kluwer Accademic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA, 1994

[44] J. D. Spragins, J. L. Hammond, K. Pawlikowski *Telecomunications protocols and design*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, USA, 1991

[45] K. Sigmon, *Matlab: primer*, 4th ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1994

[46] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, USA, 1997

[47] J. D. Kraus, *Antennas*, McGraw Hill, New York, USA, 1950

[48] W. L. Stutzman, G. A. Thiele *Antenna theory and design*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1981

[49] G. Vecchi, *Appunti sull'irradiazione e le antenne*, C.L.U.T., Torino, Italy, 1998

[50] G. Monti Guarnieri, *Nozioni sui ponti radio*, IV ed., Tamburini editore, Milano, Italia, 1971

[51] L. J. Ippolito jr., *Radiowave propagation in satellite communication*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA, 1986