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 11

# Conclusioni

L'obiettivo del lavoro svolto in questa tesi è stato la definizione delle specifiche per il sistema di telecomando e telemetria della piattaforma stratosferica Heliplat: sono stati presi in considerazione sia gli apparati di terra che quelli di bordo, effettuando uno studio sulle caratteristiche di modulazione, su quelle di codifica, sul calcolo del link-budget e sulla realizzabilità delle antenne. Uno schema riassuntivo delle specifiche risulatanti è riportato nella tabella 11.1.

Inizialmente si è deciso di analizzare lo standard proposto dal CCSDS per il telecomando e la telemetria dei sistemi satellitari; la complessa struttura proposta è stata semplificata mantenendone le parti fondamentali per non appesantire eccessivamente il sistema. In seguito, tramite la collaborazione con alcuni Dipartimenti del Politecnico di Torino, sono stati ricavati i tipi di dati, con la relativa frequenza, che occorre trasmettere e ricevere: il risultato di questa ricerca ha portato alla stima del flusso dati d'informazione, indicato in tabella con $R_b$. L'obiettivo successivo era quello di analizzare diversi schemi di modulazione per determinare quali di essi fosse più idoneo per poter essere utilizzato in presenza di un canale radio affetto da Doppler e multipath: questo studio ha portato alla scelta della modulazione DQPSK.

A questo punto, in seguito all'analisi delle prestazioni ottenute, si è deciso di applicare uno schema di codifica che permettesse di raggiungere bassi valori di probabilità d'errore. Si è partiti dal modello proposto dal CCSDS e dopo un'accurata analisi, sia dal punto di vista delle prestazioni in termini

Tabella 11.1. Riepilogo delle specifiche di telecomando e telemetria per la piattaforma stratosferica senza pilota Heliplat

| **Tratta** | **up-link** | | **down-link** |
|---|---|---|---|
| $R_b$ (d'informazione) [kbit/s] | 32 | 100 | 32 |
| Modulazione | DQPSK | DQPSK | DQPSK |
| Tipo di codifica | BCH(63,51) + ARQ | BCH(63,51) + ARQ | convol.(2,1,7) + RS(31,23) |
| $R_{b,cod}$ (effettivo) [kbit/s] | 40 | 124 | 86 |
| Tipo di antenna in TX | a ventaglio | | a elica |
| Apertura antenna in TX | elevaz.: 90°; azimut: 10° | | 5×60.5° |
| Guadagno ant. in TX [dB] | 17 | 17 | 8.2 |
| $p_b$(e) target | BCH: $10^{-3}$ $\Downarrow$ ARQ: $10^{-8}$ | BCH: $10^{-3}$ $\Downarrow$ ARQ: $10^{-8}$ | convol.: $10^{-4}$ $\Downarrow$ RS: $10^{-12}$ |
| $(E_b/N_0)_{min}$ in RX [dB] | 10÷27 | 10÷27 | 10÷27 |
| $P_{TX}$ minima [mW] | 0.116÷11.44 | 0.362÷35.75 | 0.253÷24.96 |
| $(E_b/N_0)_{P_{TX}=1W}$ in RX [dB] | 29.4÷55.4 | 24.5÷50.4 | 26÷52 |
| $(\text{margine})_{P_{TX}=1W}$ [dB] | 19.4÷39.4 | 14.5÷34.4 | 16÷36 |

di probabilità d'errore che di ritardi, sono state apportate le opportune modifiche che lo adattassero al sistema Heliplat. Si è così deciso di utilizzare un codice BCH (63,51) seguito da un protocollo ARQ, per quanto riguarda la tratta in up-link, e un codice concatenato costituito da un convoluzionale (2,1,7) seguito da un Reed-Solomon (31,23), per la tratta in down-link. L'applicazione della codifica ha prodotto un aumento del bit rate, passando da quello d'informazione $R_b$ a quello effettivo $R_{b,cod}$. Nel calcolo prestazionale si è anche tenuto conto dei tempi di ritardo causati principalmente dalla presenza di un interlacciatore all'interno del codice concatenato.

In seguito sono state proposte diverse soluzioni per valutare l'effettiva possibilità di realizzare le antenne di terra e di bordo. Lo studio effettuato ha portato alla scelta di un'antenna a ventaglio, con un'apertura di 90° in elevazione e 10° in azimut, per l'antenna di terra, e di un'antenna che coprisse circa 180°, per quella di bordo; le aperture indicate per entrambi i tipi di antenna, sono relative alla larghezza del fascio a -3 dB rispetto al massimo

(HPBW, *Half Power Beam Width*). La prima è stata realizzata mediante una schiera lineare di dipoli alimentati da una corrente con distribuzione d'ampiezza a coseno, prevedendo l'eventuale possibilità di variarne la fase in modo da riuscire ad effettuare un inseguimento elettronico del velivolo; la seconda, invece, è stata realizzata mediante una serie di cinque antenne ad elica opportunamente disposte, in grado di fornire una polarizzazione di tipo ellittico.

L'ultimo passo è stato quello di effettuare un'analisi in termini di link-budget per valutare l'entità della potenza trasmessa. A questo scopo sono stati fissati dei valori di probabilità d'errore sul bit, identificati come target e in grado di soddisfare dei requisiti minimi di affidabilità, che potessero essere raggiunti con un'adeguato valore di rapporto segnale/rumore ricevuto. Nelle ultime righe della tabella 11.1 è stato riportato soltanto l'intervallo di valori dei vari parametri, in modo da dare un'idea dell'ordine di grandezza: una trattazione più dettagliata, al variare della distanza del collegamento, è stata effettuata nel capitolo 10. Le potenze minime che devono essere trasmesse raggiungono al più qualche decina di milliwatt; questo risultato è confortante, data la scarsa disponibilità a bordo. Supponendo, però, di trasmettere una potenza pari a 1 W, i valori di $E_b/N_0$ ricevuti risultano molto più elevati dei precedenti e di conseguenza anche le probabilità d'errore appariranno alquanto inferiori rispetto a quelle target. Nella tabella 11.1, sempre nel caso di potenza trasmessa unitaria, vengono anche riportati i margini che si hanno a disposizione nel caso in cui ci si limiti al raggiungimento delle probabilità d'errore target: i valori ottenuti sono di alcune decine di decibel.

Lo studio svolto in questa tesi ha portato alla definizione delle specifiche per quanto riguarda la parte trasmissiva e di codifica del sistema di telecomando e telemetria di Heliplat. Sarà necessario, in futuro, approfondire il progetto di massima delle antenne di terra e di bordo, definendo le specifiche realizzative dei diversi dispositivi. Sarà inoltre indispensabile un approfondimento riguardante gli strati di livello superiore rispetto a quelli trattati nel presente lavoro; è infatti necessario conoscere gli esatti formati dei pacchetti, le temporizzazioni e le sincronizzazioni opportune, nonché le tecniche di multiplazione dei flussi dati d'utente.

# 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