

Mezzi di trasmissione per l'informazione

Francesco Morichetti

Politecnico di Milano

Andrea Melloni

Politecnico di Milano

Indice

Indice analitico	I
Prefazione	V
1 Mezzi di trasmissione e segnali	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Il livello fisico	4
1.3 Mezzi di trasmissione	5
1.3.1 Mezzi guidanti	5
1.3.2 Spazio libero	7
1.4 Parametri caratteristici	10
1.4.1 Attenuazione	10
1.4.2 Frequenza e banda	11
1.4.3 Velocità e ritardo	13
1.4.4 Lunghezza d'onda	14
1.4.5 Selettività in frequenza e dispersione	15
1.4.6 Diafonia e immunità a disturbi elettromagnetici	16
1.4.7 Retroriflessioni e cammini multipli	17
1.4.8 Parametri tipici dei mezzi di trasmissione	17
1.5 Rappresentazione logaritmica: i decibel (dB)	19
1.6 Segnali nel dominio delle frequenze	20
1.6.1 Segnali e bit	21
1.6.2 Segnali periodici (Serie di Fourier)	22
1.6.3 Segnali non periodici (Trasformata di Fourier)	24
1.6.4 Sistemi lineari tempo-invarianti (LTI)	27
1.6.5 Fasori	28
1.6.6 Funzione di trasferimento	29

II

1.7	Mezzo di trasmissione ideale	31
1.8	Lo spettro elettromagnetico	32
2	Linee di trasmissione	37
2.1	Introduzione	37
2.2	Modello circuitale di una linea di trasmissione	38
2.2.1	Circuiti a parametri concentrati e circuiti a parametri distri- buiti	38
2.2.2	Circuito equivalente di una linea di trasmissione	40
2.3	Equazioni delle linee (o dei telegrafisti)	43
2.3.1	Derivazione delle equazioni delle linee	43
2.3.2	Soluzione delle equazioni delle linee	45
2.3.3	Onde di tensione e onde di corrente: interpretazione fisica	49
2.4	Circuiti contenenti linee di trasmissione	55
2.4.1	Coefficiente di riflessione	55
2.4.2	Tensione e corrente lungo la linea: onde stazionarie	58
2.4.3	Impedenza d'onda	63
2.4.4	Casi particolari di linee senza perdite	65
2.5	Trasferimento di potenza	69
2.5.1	Potenza media e potenza istantanea	70
2.5.2	Adattamento di impedenza	73
2.6	Esempi di linee di trasmissione	77
2.6.1	Cavo coassiale	77
2.6.2	Linea bifilare (doppino o twisted pair)	80
2.7	Applicazioni	84
2.7.1	ADSL su doppino telefonico	84
2.7.2	Cavi Ethernet	86
2.7.3	Cavi USB	88
2.7.4	Power-line Communications	89
3	Onde elettromagnetiche	91
3.1	Introduzione	91
3.2	Dalle linee di trasmissione alle onde elettromagnetiche	93
3.2.1	Orientamento del campo elettromagnetico	97
3.2.2	Impedenza intrinseca	99
3.2.3	Costante di propagazione	101
3.3	Onde elettromagnetiche nei mezzi materiali	102
3.3.1	Mezzo ideale (senza perdite)	103
3.3.2	Buon dielettrico (piccole perdite)	104
3.3.3	Buon conduttore	104
3.4	Effetto pelle	105
3.5	Onde nello spazio: vettore d'onda	107
3.6	Polarizzazione	109
3.7	Densità di potenza: vettore di Poynting	112
3.7.1	Trasporto di potenza in mezzi senza perdite	114

3.7.2	Trasporto di potenza in mezzi con perdite	114
3.8	Riflessione e trasmissione da interfaccia piana	115
3.8.1	Incidenza normale	115
3.8.2	Incidenza obliqua: legge di Snell	118
3.9	Equivalenza tra onde elettromagnetiche e linee di trasmissione	121
4	Radiazione e propagazione in spazio libero	125
4.1	Introduzione	125
4.2	Radiazione	126
4.2.1	Dipolo Hertziano	127
4.2.2	Potenza irradiata	133
4.3	Grandezze caratteristiche delle antenne	134
4.3.1	Resistenza di radiazione	134
4.3.2	Diagramma di radiazione	134
4.3.3	Direttività	136
4.3.4	Guadagno	138
4.3.5	Area efficace	138
4.3.6	Banda	140
4.4	Collegamento in spazio libero	141
4.5	Propagazione non guidata	142
4.5.1	Atmosfera	143
4.5.2	Fenomeni atmosferici	145
4.5.3	Ionosfera	146
4.5.4	Ambiente urbano e indoor	148
4.6	Esempi di collegamenti reali	150
4.6.1	Collegamento satellite geostazionario-terra	150
4.6.2	Cammini multipli	151
4.6.3	Effetto Doppler	154
4.7	Collegamenti ottici	155
4.7.1	Fasci gaussiani	155
4.7.2	Visible Light Communications	156
4.8	RFID	158
5	Fibre ottiche	163
5.1	Introduzione	163
5.2	Fibre ottiche	164
5.2.1	Struttura delle fibre ottiche	164
5.2.2	Parametri caratteristici di una fibra ottica	166
5.3	Attenuazione	168
5.4	La propagazione nelle guide dielettriche	170
5.4.1	Riflessione totale	171
5.4.2	Apertura numerica	173
5.5	La guida piana infinita	174
5.6	Modi guidati e diagramma di dispersione	176
5.6.1	Frequenza di cut-off f_c	178

IV

5.6.2	Indice di rifrazione efficace n_{eff}	179
5.6.3	Forma dei modi guidati	180
5.6.4	Velocità di fase e velocità di gruppo	182
5.6.5	Polarizzazione	183
5.6.6	Espansione modale ed eccitazione dei modi	183
5.6.7	Modi radiativi	184
5.7	Fibre singolo-modo e fibre multi-modo	185
5.8	Dispersione	187
5.8.1	Dispersione modale	187
5.8.2	Dispersione cromatica	188
5.8.3	Dispersione di polarizzazione	189
5.9	Effetti della dispersione sul segnale	190
5.9.1	Limitazioni sulla distanza di propagazione	190
5.9.2	Propagazione di impulsi gaussiani	194
5.10	Tecnologia delle fibre ottiche	197
5.11	Comunicazioni ottiche	200
5.11.1	Prospettiva storica	201
5.11.2	Principi di comunicazioni ottiche	204
5.11.3	Evoluzione dei sistemi di comunicazioni ottiche	206
5.11.4	Amplificatore ottico	211
Appendici		216
A Costanti fondamentali		217
B Tabella degli ordini di grandezza		219
C Parametri elettrici di un cavo coassiale		221
C.1	Capacità per unità di lunghezza C	221
C.2	Induttanza per unità di lunghezza L	223
C.3	Conduttanza per unità di lunghezza G	224
C.4	Resistenza per unità di lunghezza R	225
D Velocità di gruppo		227

Prefazione

Nell'era dell'Informazione e Comunicazione vengono spostati continuamente enormi quantità di dati su distanze che vanno dai milioni di chilometri delle trasmissioni con lo spazio profondo ai millimetri che separano CPU e memorie nei moderni computers. Tutti i dati viaggiano su supporti fisici chiamati Mezzi di Trasmissione e il loro insieme costituisce l'infrastruttura fisica dell'ICT (Information and Communication Technology). Chi lavora nel settore non può ignorare quali siano i mezzi fisici disponibili, le loro potenzialità, limiti ed evoluzioni future e, in ultima analisi, dove e come investire.

Una infrastruttura fisica dura molti anni ed è la parte con l'impatto economico maggiore su una rete di comunicazione. Se si pensa che attualmente quasi il 10% della totale energia elettrica prodotta a livello mondiale è consumata dall'ICT, corrispondente a circa il 3% delle emissioni di CO₂ globali, è chiaro che un efficiente, ben concepito e ben utilizzato mezzo trasmissivo contribuisce in modo consistente a ridurre i costi di esercizio e a preservare il nostro ambiente.

In questo libro sono trattati i principali mezzi utilizzati nella trasmissione dell'informazione: i cavi metallici (cavo coassiale e linea bifilare), lo spazio libero e le fibre ottiche. Sebbene le caratteristiche fisiche, i materiali impiegati e le geometrie siano molto diverse, questi mezzi sono caratterizzati dal fatto che l'informazione si trasmette attraverso un fenomeno fisico comune: le onde elettromagnetiche.

Una delle sfide di questo libro è riuscire ad affrontare in modo rigoroso lo studio dei mezzi di trasmissione limitando al massimo l'utilizzo del formalismo proprio dei campi elettromagnetici. Si spiegano comportamenti, limiti e potenzialità dei mezzi di trasmissione e si confrontano tra loro più da un punto di vista funzionale che fisico, in modo da consentirne lo studio anche da parte di chi non ha una solida cultura elettromagnetica e di fisica della materia. I risultati e le conclusioni qui riportate hanno una solidità tale da essere valide anche in un lontano futuro, indipendentemente da come evolveranno i sistemi di comunicazione, permettendo di capire quali siano i limiti tecnologici e quali quelli fisici.

La trattazione è organizzata in cinque capitoli così strutturati.

Il Capitolo 1 introduce i mezzi di trasmissione e i loro parametri caratteristici (attenuazione, banda, ritardo, dispersione,...), la cui conoscenza è fondamentale per una comprensione funzionale dei mezzi e per poterne valutare correttamente l'utilizzo in un sistema di comunicazioni. Dopo una breve panoramica sui principali mezzi di trasmissione e sulle loro caratteristiche, sono introdotti gli elementi di base della teoria di Fourier per la descrizione dei segnali e dei mezzi di trasmissione nel dominio delle frequenze. Una breve illustrazione dell'intero spettro elettromagnetico chiude il capitolo.

Il Capitolo 2 tratta nel dettaglio la teoria della propagazione nelle linee di trasmissione costituite da coppie di conduttori metallici, come il cavo coassiale e la linea bifilare (doppino). Queste strutture sono studiate partendo dai concetti di base validi per i circuiti elettrici a bassa frequenza, senza fare riferimento esplicito alla teoria delle onde elettromagnetiche. A partire dal modello circuitale di una generica linea di trasmissione a due conduttori, sono ricavate le equazioni che governano la propagazione delle onde nelle linee e viene data un'interpretazione fisica delle onde di tensione e corrente. Quindi sono introdotti semplici circuiti contenenti linee di trasmissione, illustrando le problematiche relative alle terminazioni di una linea su un carico (ricevitore o antenna) e al trasferimento di potenza lungo una linea. Sono inoltre discussi in dettaglio i due esempi di cavi elettrici più utilizzati oggi, il cavo coassiale e la linea bifilare, e le applicazioni più comuni, come ad esempio le trasmissioni ADSL, i cavi Ethernet, i cavi USB e le comunicazioni su linee elettriche (power-line communication).

Il Capitolo 3 introduce e tratta con un certo rigore le onde elettromagnetiche piane e la propagazione nei mezzi materiali. L'argomento non è presentato in modo classico partendo dalle equazioni di Maxwell ma seguendo un percorso alternativo. L'equazione delle onde (equazione di Helmholtz) viene ricavata in modo "semiempirico", sfruttando quanto più possibile le analogie esistenti con l'equazione delle onde ricavata per le linee di trasmissione nel Cap. 2 e mettendo in risalto le differenze più significative. Questo approccio ha un duplice vantaggio: da un lato offre a chi non ha solide basi di elettro(magneto)dinamica gli strumenti essenziali per affrontare lo studio delle onde elettromagnetiche e comprenderne le proprietà più significative; dall'altro permette di creare un collegamento diretto tra le proprietà e i fenomeni a cui è soggetta un'onda elettromagnetica e quanto avviene nella propagazione delle onde di tensione/corrente in una linea di trasmissione. Viene quindi presentato il comportamento delle onde elettromagnetiche nei mezzi materiali, introducendo i parametri tipici di un'onda elettromagnetica (vettore d'onda, polarizzazione, densità di potenza,...), e vengono presentati i fenomeni di riflessione e rifrazione da interfaccia piana. Il capitolo termina con un'analogia tra onde elettromagnetiche e linee di trasmissione, fondamentale per trattare problemi trasmissione e riflessione da discontinuità semplici e multiple (multistrati).

Il Capitolo 4 è dedicato alla propagazione delle onde elettromagnetiche nello spazio libero ed alle loro applicazioni nella trasmissione dell'informazione. Si studiano i fenomeni legati alla generazione delle onde elettromagnetiche, o radiazione, e gli effetti legati all'interazione delle onde con l'ambiente, che costituisce il mez-

zo di trasmissione per la propagazione in spazio libero. Il concetto di radiazione viene introdotto in modo elementare ma intuitivo. L'attenzione è principalmente focalizzata sui parametri caratteristici dei dispositivi atti a trasmettere e ricevere le onde, le antenne, e sugli strumenti necessari per il dimensionamento e l'analisi di semplici collegamenti in spazio libero. Viene inoltre valutato l'effetto di ostacoli e cammini multipli nel collegamento stesso, fornendo esempi di collegamenti reali. Il capitolo si conclude con una rassegna sulle applicazioni ottiche e radio (Li-Fi, RFID) che sfruttano la radiazione elettromagnetica in spazio libero.

Il Capitolo 5 tratta lo studio di strutture guidanti che operano alle frequenze ottiche, cioè a frequenze superiori a 100 THz. Esse sono costituite da materiali dielettrici e l'esempio più noto è la fibra ottica. Della fibra ottica viene illustrata la struttura e vengono definiti i parametri fisici più significativi ai fini della propagazione guidata e per il suo utilizzo nelle comunicazioni ottiche. Il meccanismo della propagazione in una fibra ottica è illustrato in modo semplice, ma efficace, ricorrendo ad un approccio basato sulle leggi dell'ottica geometrica applicate ad una guida planare dielettrica. Questo approccio consente di introdurre il concetto di modi guidati e radiativi e il diagramma di dispersione, senza le complicazioni di una trattazione elettromagnetica rigorosa. Sono descritte le caratteristiche principali delle fibre singolo modo e multimodo e viene presentata l'origine fisica delle varie forme di dispersione presenti in una fibra ottica, illustrando nel dettaglio gli effetti distorcimenti sulla propagazione di un segnale. Vengono inoltre richiamati alcuni aspetti legati alla tecnologia di fabbricazione delle fibre e le principali applicazioni nel campo delle comunicazioni ottiche.

Due semplici Appendici (A e B) riportano rispettivamente le costanti fondamentali usate nel testo e gli ordini di grandezza più usati. Nell'Appendice C si ricavano le espressioni dei parametri elettrici di una linea di trasmissione, cercando di limitare al massimo l'uso di conoscenze relative ai campi elettromagnetici. L'Appendice D tratta con un certo dettaglio la velocità di gruppo e il suo legame alla velocità di fase e alla dispersione cromatica.