

Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione X
Propagazione guidata


LEZIONE X

PROPAGAZIONE GUIDATA

Corso di
“Teoria e tecnica delle onde elettromagnetiche”

Prof. Giuseppe Pelosi
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni
Università di Firenze
E-mail: giuseppe.pelosi@unifi.it
URL: <http://www.cem.unifi.it/>

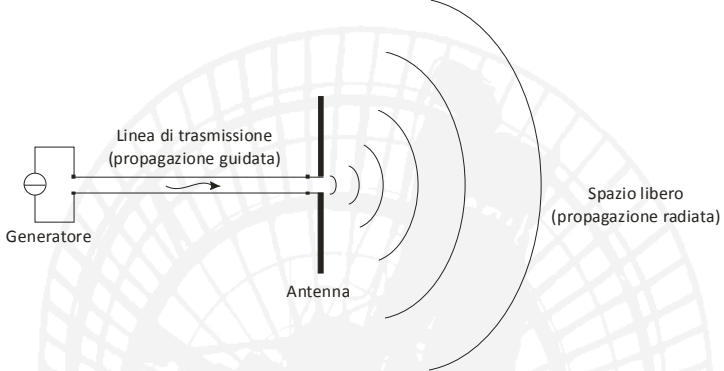
1/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze


Lezione X
Propagazione guidata

PROPAGAZIONE GUIDATA E PROPAGAZIONE RADIATA



Linee di trasmissione	Guide d'onda
Strutture guidanti costituite da più conduttori metallici isolati uni dagli altri (linea bifilare, cavo coassiale)	Strutture guidanti in cui la propagazione di un'onda elettromagnetica è generalmente assicurata da riflessioni multiple sia sulle pareti in metallo (guide d'onda metalliche) sia sulla superficie di separazione di mezzi dielettrici (guide d'onda dielettriche, fibre ottiche)


2/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze


Lezione X
Propagazione guidata

STRUTTURE GUIDANTI



- 1) Aperte o chiuse
- 2) Omogenee o disomogenee
- 3) Dotate o meno di conduttori

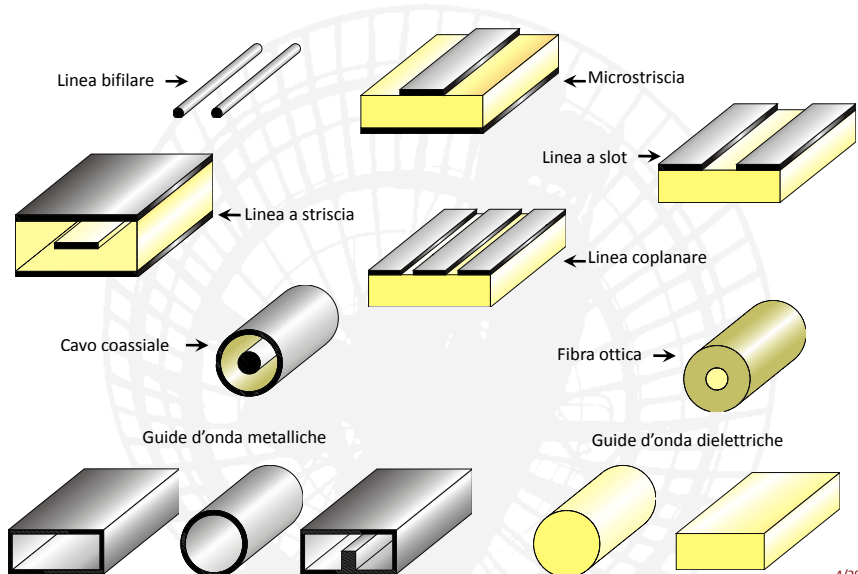
3/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione X
Propagazione guidata

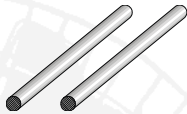
CLASSIFICAZIONE DELLE LINEE E DELLE GUIDE



4/30

CLASSIFICAZIONE DELLE LINEE E DELLE GUIDE		Lezione X Propagazione guidata		
Strutture		Senza conduttori	Un conduttore	Due conduttori
Aperte	Omogenee	Spazio libero		Linee bifilari, Striplines
	Non omogenee	Guide dielettriche, Fibre ottiche, Onde in mezzi non omogenei		Microstrip, Slot lines, Linee coplanari, Linee bifilari isolate
Chiuse	Omogenee	----	Guide metalliche	Cavi coassiali
	Non omogenee	----	Guide metalliche caricate	Cavi coassiali caricati

5/30

LINEA BIFILARE		Lezione X Propagazione guidata	
<p>La linea bifilare è già stata studiata nel corso di Fondamenti di Elettromagnetismo</p> 		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Struttura costituita da due fili metallici isolati tra di loro ❖ Applicazioni prevalentemente in bassa frequenza (fino a qualche centinaio di MHz) ❖ Comportamento radiativo all'aumentare della frequenza ❖ Basso costo realizzativo e di messa in opera 	

6/30

LINEA BIFILARE

Lezione X
Propagazione guidata

Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Esempio di utilizzo per cablaggi ethernet

7/30

TIPOLOGIE DI STRUTTURA CHE APPROFONDIAMO

Lezione X
Propagazione guidata

Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Prenderemo in considerazione tre tipologie di struttura:

- Guide metalliche rettangolari e circolari
- Fibre ottiche
- Microstrisce

8/30

GUIDE D'ONDA METALLICHE

Lezione X
Propagazione guidata

Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

GUIDE D'ONDA METALLICHE

9/30

GUIDE D'ONDA METALLICHE

Lezione X
Propagazione guidata

Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Esempi di utilizzo delle guide d'onda rettangolari per la connessione dei feed di una antenna radar

10/30

GUIDE D'ONDA METALLICHE

Lezione X
Propagazione guidata

Antenna radar a slot su guide d'onda per osservazioni meteorologiche della BENDIX

11/30

GUIDE D'ONDA METALLICHE

Lezione X
Propagazione guidata

Tra i vantaggi:

- Costo limitato
- Robustezza meccanica
- Elevata affidabilità
- Immunità disturbi radiati
- Basse perdite per unità di lunghezza

Tra gli svantaggi:

- Rigidità meccanica
- Peso e ingombro

Filtro a microonde in guida d'onda rettangolare

12/30

6

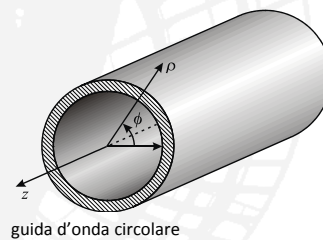
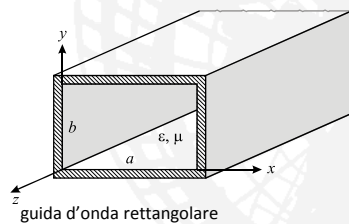


GUIDE D'ONDA METALLICHE

Lezione X
Propagazione guidata

Ipotesi:

- Le strutture guidanti risultano a **sezione uniforme** e costituite da pareti metalliche perfettamente conduttrici ($\sigma \rightarrow \infty$)
- Tale struttura è immersa in uno spazio dielettrico **omogeneo** (ϵ e μ indipendenti dal punto), **isotropo** (ϵ e μ quantità scalari) e **privo di perdite** (ϵ e μ reali)



13/30



GUIDE D'ONDA METALLICHE

Lezione X
Propagazione guidata


Si parte dalle equazioni di Maxwell...

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{h} &= \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} + \mathbf{j} \\ \nabla \times \mathbf{e} &= -\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{d} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{b} &= 0\end{aligned}$$

I vettori \mathbf{e} e \mathbf{h} indicano rispettivamente il campo elettrico e quello magnetico e $\mathbf{d}(=\epsilon\mathbf{e})$ e $\mathbf{b}(=\mu\mathbf{h})$ sono rispettivamente le densità di flusso elettrico e magnetico, dove tutti i vettori sono una funzione arbitraria del tempo. \mathbf{j} e ρ sono la densità di corrente e di carica rispettivamente.

Per mezzi perfettamente dielettrici i quali non contengono cariche libere e densità di corrente, le precedenti equazioni di Maxwell si scrivono ponendo $\rho=0$ e $\mathbf{j}=0$

14/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione X

GUIDE D'ONDA METALLICHE

Propagazione guidata

Prendendo la seconda delle precedenti equazioni di Maxwell e applicando il rotore e sostituendo nella prima avendo posto $j = 0$ si ottiene:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{e} = -\mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2}$$

Usando la seguente identità vettoriale

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla \nabla \cdot \mathbf{A} - \nabla^2 \mathbf{A}$$


Possiamo scrivere:

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{e} - \nabla^2 \mathbf{e} = -\mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2}$$

Essendo $\rho = 0$ si uguaglia a zero anche $\nabla \cdot \mathbf{d}$, e $\nabla \cdot \mathbf{e}$ che quindi permette di scrivere:

$$\nabla^2 \mathbf{e} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2}$$

15/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione X

GUIDE D'ONDA METALLICHE

Propagazione guidata

Analogamente per il campo magnetico:

$$\nabla^2 \mathbf{h} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial t^2}$$

La variazione temporale del campo elettrico \mathbf{e} è espressa da $e^{j\omega t}$ come di seguito:


$$\mathbf{e}(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\{\mathbf{E}(\mathbf{r})e^{j\omega t}\}$$

Dove ω è la pulsazione espressa in radianti, $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ è un vettore complesso non dipendente dal tempo

L'espressione per il campo elettrico può essere scritta come segue:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\omega^2 \mu\epsilon \mathbf{E}$$

16/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione X

GUIDE D'ONDA METALLICHE

Propagazione guidata

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\omega^2 \mu \epsilon \mathbf{E}$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = -\omega^2 \mu \epsilon \mathbf{H}$$

La soluzione delle equazioni di Helmholtz è soggetta alle condizioni al contorno sulle pareti della guida:

1. Il campo elettrico tangente alle pareti deve essere nullo
2. La componente normale del campo magnetico deve essere nulla

Il campo si rappresenta come somma delle autofunzioni delle equazioni di Helmholtz, che prendono il nome di modi.

Se la struttura è semplicemente connessa ci sono modi TE ($E_z=0$) e TM ($H_z=0$)

Se la struttura doppiamente connessa (ad esempio il cavo coassiale) ci sono anche modi TEM ($E_z=H_z=0$)

17/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione X

ESEMPIO DI STRUTTURA DOPPIAMENTE CONNESSA: IL CAVO COASSIALE

Propagazione guidata

Struttura cilindrica a sezione circolare con un conduttore esterno (calza) ed un conduttore interno (anima) concentrico separati da dielettrico




Esempio di impiego di un cavo coassiale per la connessione del feed di una antenna a riflettore





Esempi di terminazione per cavo coassiale

18/30



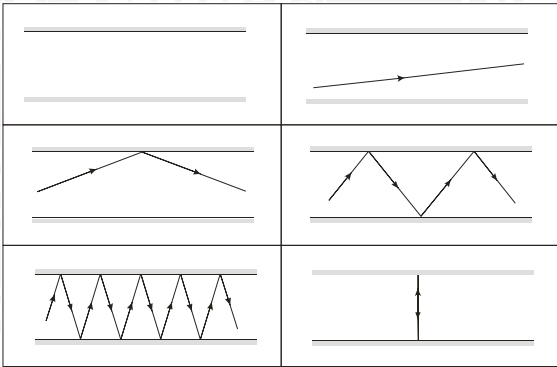
Lezione X

Propagazione guidata

Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
 Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
 Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

INTERPRETAZIONE FISICA DELLA PROPAGAZIONE IN GUIDA METALLICA

Propagazione all'interno di una guida costituita da due piatti paralleli indefiniti perfettamente conduttori



19/30



Lezione X


Propagazione guidata

Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
 Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
 Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

FIBRE OTTICHE

FIBRE OTTICHE

20/30

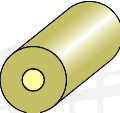



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

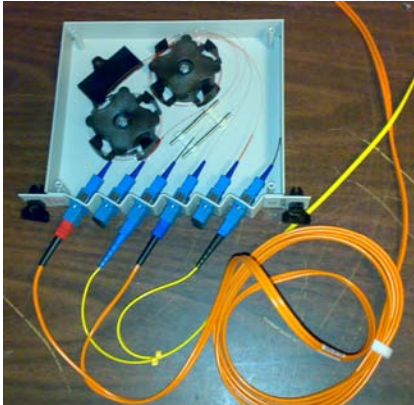
FIBRE OTTICHE

Lezione X
Propagazione guidata


Fibra ottica →








Esempio di punto di connessione e controllo per link per TLC in fibra ottica



Terminatori e giunzioni per fibre ottiche

21/30



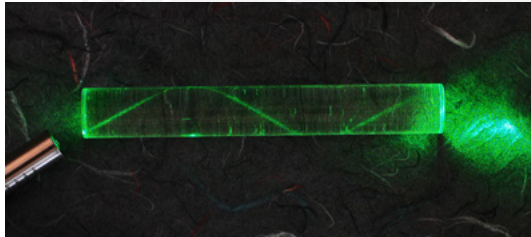
Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

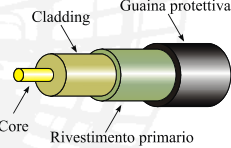
FIBRE OTTICHE

Lezione X
Propagazione guidata


Tra i vantaggi principali:

- Alta capacità trasmissiva (fino a decine Terabit/s)
- Bassa attenuazione ($\sim 0.1\text{dB/km}$), dipendente dalla lunghezza d'onda
- Dimensioni e peso ridotte e costi contenuti





22/30




Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

FIBRE OTTICHE


Lezione X
Propagazione guidata

Un esempio di sistema ottico di trasmissione ad altissima capacità delle ultime generazioni è il cavo transcontinentale FLAG (Fiber-Optic Link Around the Globe).

Il FLAG si estende ininterrottamente per 27,500 km dalla Gran Bretagna al Giappone (costituisce infatti il più esteso manufatto mai realizzato dall'uomo) collegando 12 paesi a 10 Gbit/s full-duplex per una capacità totale di circa 120,000 canali telefonici su due coppie di fibre a 5 Gbit/s per coppia.



23/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze


FIBRE OTTICHE

Lezione X
Propagazione guidata

Ciclo di seminari specialistici del Prof. Someda (Università di Padova) - 26-27 Novembre 2008

- *La trasmissione in fibra ottica: le ragioni di un rapido successo*
- *Guide dielettriche a salto d'indice: il modello della lastra piana*
- *Guide dielettriche a salto d'indice: barre a sezione circolare*
- *Fibre ottiche monomodali e multimodali*
- *Attenuazione nelle guide dielettriche*
- *Dispersione intermodale e dispersione cromatica*
- *La dispersione di polarizzazione*
- *Effetti non lineari nelle fibre ottiche*

24/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione X

INTERPRETAZIONE FISICA DELLA PROPAGAZIONE IN FIBRA OTTICA

Propagazione guidata

Propagazione all'interno di una fibra ottica

Legge di Snell:

$$\theta_t = \theta_i$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

Indici di rifrazione:

$$n_1 = \sqrt{\epsilon_{r1} \mu_{r1}}$$


$$n_2 = \sqrt{\epsilon_{r2} \mu_{r2}}$$

Angolo critico

$$\sin^2 \theta_c = \frac{\mu_2 \epsilon_2}{\mu_1 \epsilon_1}$$

se $(\mu_1 = \mu_2 = \mu_0) \Rightarrow \theta_c = \sin^{-1} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$

25/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione X

INTERPRETAZIONE FISICA DELLA PROPAGAZIONE FIBRA OTTICA

Propagazione guidata

Propagazione all'interno di una fibra ottica

26/30

LINEA IN MICROSTRISCIA

Lezione X
Propagazione guidata

Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

LINEA IN MICROSTRISCIA

27/30

MICROSTRISCIA, LINEA A SLOT, LINEA COPLANARE

Lezione X
Propagazione guidata

Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Microstriscia


Linea a slot

Linea coplanare

Circuito stampato in microstriscia per un amplificatore a basso rumore (*Low Noise Amplifier*, LNA) in banda 900 MHz e 1500 MHz

Accoppiatore bi-direzionale in microstriscia alla frequenza centrale 1.83 GHz

28/30



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

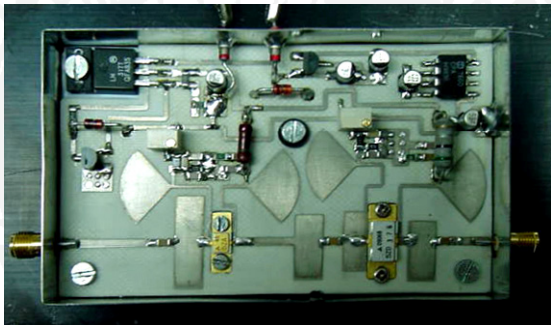
Lezione X

Propagazione guidata

MICROSTRISCIA, LINEA A SLOT, LINEA COPLANARE


Tra le caratteristiche:

- Piste metalliche realizzate su un lato di un materiale dielettrico
- Applicazioni alla frequenza delle microonde e delle onde millimetriche
- Realizzazione mediante le tecniche planari impiegate per la realizzazione dei circuiti integrati



Prototipo di un amplificatore a basso rumore (LNA) in banda 900 MHz e 1500 MHz

29/30



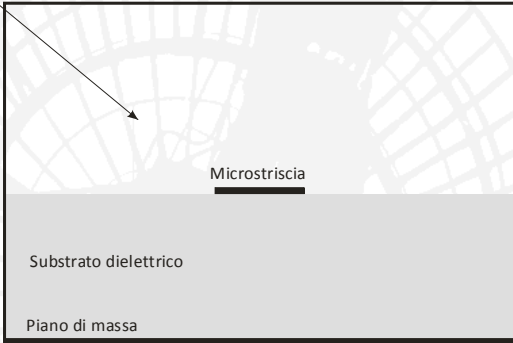
Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione X

Propagazione guidata

LINEA IN MICROSTRISCIA

Soluzione delle equazioni di Maxwell all'interno di un box metallico mediante il metodo delle differenze finite



30/30