COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

INTRODUÇÃO

- Sistemas de comunicação óptica são aqueles que transmitem a informação na forma eletromagnética utilizando para tanto as chamadas frequências ópticas, cuja ordem de grandeza é $f \sim 100\text{THz}$ ($\lambda \sim 1\mu\text{m}$). São denominados também "Lightwave Systems", comumente.

- O estudo da luz é um dos ramos mais antigos das ciências. Podem ser citados como sistemas de comunicações ópticos os faróis marítimos e os semáforos, utilizados desde a Antiguidade, porém sistemas ópticos de alta capacidade baseados em lasers e na fibra óptica só foram possíveis a partir dos anos 1960. As comunicações ópticas tiveram início efetivamente em 1975.

Banda de Frequências (f)	**Compr. de onda ($\lambda = c/f$)**	**Denominação Usual**	**Exemplos de Aplicações**
30-300 Hz	$10^4 - 10^3$ km	ELF (Ondas Megamétricas)	Com. Militares
300-300 Hz	$10^3 - 10^2$ km	VF (Banda de Voz)	Telefonia Analógica
3 -30 kHz	$10^2 - 10$ km	VLF (Ondas Muito Longas)	Com. Militares
30-300 kHz	$10 - 1$ km	LF (Ondas Longas)	Com. Militares
300-3000 kHz	$1000 - 100$ m	MF (Ondas Médias)	Radionaveg., Broadcasting AM
3-30 MHz	$100 - 10$ m	HF (Ondas Curtas)	*Radionaveg.*, *Broadcasting* *Com. Longas dist.*
30-300 MHz	$10 - 1$ m	VHF (Ondas muito curtas)	*Broadcasting de TV e Radio FM* *Telefonia*
0.3-3 GHz	$100 - 10$ cm	UHF (Microondas)	*Radares*, *TV*, *Telefonia* *Forno Microondas* *Com. Via Satelite*
3-30 GHz	$10 - 1$ cm	SHF (Microondas)	*Radares*, *Com.Militar* *Com.Curtas Distancias* *Com. Via Satelite*
30-300 GHz	$10 - 1$ mm	EHF (Microondas)	Radar, Apl. Militares
300-3000 GHz	$1 - 0.1$ mm	ELF (Ondas Sub-milimétricas)	Pouco Explorado em Com.
0.3-375 THz	$100 - 0.8$ μm	Infravermelho	**Comunicações Ópticas**
375-790 THz	$800 - 379$ nm	Espectro Visivel	*Mouses apticos* *Olho Humano*, *Semaforos*
790-22500 THz	$379 - 13$ nm	Ultravioleta	*Ioniz. de Gases Atmosfericos* *Danos a saude*, *etc*
$f > 22500$ THz	$\lambda < 13$ nm	Raios X e Radiação Gama	*Apl. em Medicina* *Raios cosmicos* "*ver*" *a estrutura da materia*

Tabela 1: Faixas de Frequência do Espectro Eletromagnético.

Desenvolvimento histórico das comunicações ópticas

- Antiguidade: - 490 a.C. - Empédocles; 300 a.C. - Euclides publicam os primeiros estudos de óptica. Filósofos e matemáticos gregos já conjecturavam a respeito dos efeitos de reflexão e refração da luz; Transmissões através de sinais luminosos e fumaça para indicar vitória em uma guerra por exemplo;

1648- Snellius descobre a lei da refração da luz.

1665- Newton propõe a teoria corpuscular da luz.

1676- o dinamarquês Olaus Römer descobre que a velocidade da luz é finita.

1678- Huygens descobre a polarização da luz.

1687- Newton publica Philosophiae naturalis principia mathematica, em que enuncia a lei da gravitação universal e resume suas descobertas.

1690- Huygens formula a teoria ondulatória da luz.

1792- Claude Chappe propõe o semáforo, um método para transmitir informações em longas distâncias, através de um sistema mecânico e vários espelhos permitia a transmissão a uma distância de 200km em 15 minutos. Várias localidades européias foram interligadas através deste sistema, que transmitia menos de 1bit/s. O processo era opto-mecânico, com vários ”repeditores”ao longo do caminho.

1801- Thomas Young - interferências luminosas. Augustin Fresnel em 1819 - teoria ondulatória da luz.

1831- Maxwell afirma o caráter eletromagnético da luz. Ao mesmo tempo nos anos 1830 a telegrafia inicia a era das comunicações ”elétricas”. O advento do código Morse possibilita taxas de transmissão de 10bits/s, com velocidade de propagação da informação muito maior do que no caso das antigas comunicações por semáforos.

1849- Fizeau mede a velocidade da luz.

1865- James Clerk Maxwell expõe a teoria eletromagnética da luz e publica as suas famosas equações. Em 1866 realiza-se a primeira conexão telegráfica transatlântica, com código Morse.

1873- Maxwell publica o seu *Treatise on Eletricity and Magnetism*: Unifica Eletricidade, Magnetismo e Óptica. Em 1876, com a invenção do Telefone aumentou bastante a demanda por largura de banda, e aumento das taxas de transmissão de sinais.

1880- Bell inventa o Photophone, capaz de alcance de 200 metros, operado com luz solar.

1888- Hertz e Oliver Lodge - provam que as ondas de rádio pertencem à mesma família das ondas de luz, dando confirmação às previsões de Maxwell. Transmissões sem fio, invenção do rádio por Marconi e o padre Landell de Moura(brasileiro).

1901- Planck - Mecânica Quântica. Liebedev prova experimentalmente a pressão da luz.

1905- Lorentz, Einstein, Poincarè - Teoria Especial da Relatividade, que nasce a partir do Eletromagnetismo. Conceito de fóton é introduzido por Einstein, na explicação para o efeito fotoelétrico (caráter corpuscular da radiação).

1910- Debye e Hondros propõe guias de ondas dielétricos, as fibras primitivas;

1920- Nos anos 20 Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Bohr, Paul Dirac, Erwin Schroedinger e outros desenvolvem formalmente a Mecânica Quântica.

1930- Lamb (Alemanha) Primeiras experiências de transmissão de luz em fibras de vidro.

1940- Esta década viu as comunicações através de cabos coaxiais ganharem desenvolvimento, transmitindo mais de 300 canais de voz ou um canal de TV em um único cabo, operando na faixa de 10MHz.

1948- Sistemas de transmissão sem fio na faixa das microondas ampliou enormemente a capacidade de transmissão que chegou então a taxas de 100Mb/s. Sistemas cabeados também evoluiram porém com necessidades de repetidores de sinal a cada 1km em média.

1951- Heel (Holanda) Hopkins e Kapany(Inglaterra): Invenção do Fiberscope - sistema de transmissão de imagens através de um feixe flexível de fibras.

1958- Shawlow e Townes(EUA): Invenção do laser;

1959- Kapany e outros(Inglaterra) propõem a fibra óptica com estrutura de núcleo e casca

1960- Maiman (EUA) opera o primeiro laser a rubi. Primeiras fibras opticas tinham atenuação de até 1000dB/km.

1962- EUA: Primeiro fotodiodo PIN de silício de alta velocidade

1963- EUA: Primeira demonstração de emissão de luz não coerente

1964- Nishizawa e outros(Japão): Proposta de guia de ondas óptico de gás com variação gradual do índice de refração

1966- Kao e Hockham(Inglaterra): Sugestão de uso de fibras de vidro com núcleo e casca em sistemas de transmissão a longa distância; Melchior e Lynch (EUA): fotodiodo de avalanche (APD) de germânio de alta velocidade

1968- Kawakami e Nishizawa(Japão), Kasonochy e outros(EUA): Análise de fibras óptica com índice gradual; Primeiro diodo laser com dupla heteroestrutura(DHS)

1969- Uchida e outros(Japão), Pearson e outros(EUA): Primeiras preformas de fibras ópticas com índice gradual

1970- Kapron e Keck(EUA): Fabricação de fibras ópticas com atenuação de

20 dB/km; Kayashi e outros(EUA): Primeiro diodo laser com operação contínua em temperatura ambiente

1971- Burrus e Miller Gloge(EUA): Primeiro LED para transmissão por fibras óptica; Teoria simplificada de fibras ópticas;

1972- Stone(EUA), Corning Glass Works(EUA) e Bell Labs(EUA): Desenvolvimento de fibras ópticas com núcleo líquido; Fabricação de fibra multimodo com perdas de 4 dB/km; Fibra óptica com 2,5 dB/km.

1975- Payne e Gambling(Inglaterra): Reconhecimento de janela de dispersão mínima para fibras ópticas de sílica

1976- Horiguchi e Osanai(Japão):Fibra óptica com 0,47 dB/km em 1200nm; Inglaterra: Primeiro sistema de CATV com fibras ópticas; EUA: Sistema experimental em campo a 45 Mbps na região de 0,82μm

1977- EUA: Primeiro sistema telefônico com fibra óptica em operação regular; Goodwin e outros(EUA): Diodo laser com vida útil superior a 7.000 hs; Dentai e outros (EUA): Desenvolvimento de LED de alta radiança em 1300nm;

1977-1978 EUA, Europa e Japão: Primeira geração de sistemas comerciais a 0,85μm em teste de campo. Primeiros sistemas experimentais com fibras multimodo em 1300nm;

1979 Miya e outros (Japão): Anunciada fibra monomodo com 0,20 dB/km em 1550nm;

1980-1981 EUA, Europa e Japão: Instalação, teste e operação da segunda geração de sistemas comerciais(1,3μm);

1981- Ainslie e outros - Demonstração de fibra monomodo com desvio de dispersão zero para 1550nm

1982- Malyion e McDonna(Inglaterra): Sistema experimental em 1,52μm com alcance sem repetidores de 102 km; Yamada e outros(Japão): Sistema experimental em 1,55μm a 2 Gbps com alcance de 51,5 km; Stern e outros(Inglaterra): Primeiras demonstrações no campo de emendas de fibras monomodo com perdas de 0,2 dB

1983- Bhagavatula(Inglaterra): Fibra monomodo com núcleo segmentado (fibra com dispersão plana); EUA, Europa e Japão: Conectores para fibra monomodo com perda inferior a 0,3 dB comercialmente disponíveis;

Japão: Sistema comercial em 1300nm a 400 Mbps e alcance sem repetidor até 25 km

1984- EUA: Sistema comercial em 1300nm a 1,7 Gbps até 40 km;

1985- AT&T Bell Labs(EUA): Sistema experimental a 4 Gbps com 103 km de alcance; Inglaterra: Sistema experimentais de fibras monomodo com dispersão deslocada mínima com alcance de 220 km (140 Mbps) e 230 km (34 Mbps); EUA, Europa e Japão: Fibras monomodo com dispersão deslocada mínima comercialmente disponíveis; Olsson e outros(EUA): Sistema experimental em 1,55μm com capacidade de 2000 Gbps.km usando 10 canais WDM;

1986- KDD (Japão):Sistema experimental em 1548nm, com fibras monomodo com dispersão deslocada a 2 Gbps a alcance de 108 km; NEC (Japão): Sistema experimental em 1530nm, com fibras monomodo com dispersão deslocada a 565 Mbps e alcance de 240 km; BRTL (Inglaterra): Sistema experimental em 1550nm, com fibra monomodo com dispersão deslocada a 2,4 Gbps e alcance de 71 km EUA, Europa e Japão: Diodo laser DFB disponível comercialmente

1987- Iwashita e Matsumoto (Japão): Sistema coerente experimental a 400 Mbps com 290 km de alcance

1988- Operação do 1º cabo óptico submarino transatlântico (TAT-8) entre EUA e Europa (França e Inglaterra); Taiwan: Cabo óptico submarino de 3ª geração (1,55μm) sem repetidores (104 km)

1990- Início da utilização da tecnologia de cristais fotônicos. Década dos Amplificadores Ópticos e sistema WDM. Em 1994 tem-se o primeiro sistema de transmissão por sólitons. 1996 vê a expansão dos sistemas WDM. Capacidades de taxa de transmissão excedem 1Tb/s.

Por quê Comunicações Ópticas?

- Necessidade de aumentar as taxas de transmissão, e para tanto é necessário aumentar a frequência da portadora do sinal;

- São sistemas praticamente imunes às interferências eletromagnéticas que sofrem outros sistemas de comunicação amplamente utilizados, dando então alta confiabilidade;

- Possibilidade de transmissão em grandes distâncias, a altas taxas de transmissão, com redução do número de cabos. Sistemas coaxiais ou outros tipos de linhas de transmissão operacionais em frequências mais baixas apresentam grandes perdas e taxas de transmissão menores, limitando as distâncias.

As Gerações das Comunicações Ópticas

- Primeira Geração: operava na faixa $\lambda = 0.8\mu$m, e lasers semicondutores de GaAs. Entrou em operação comercial em 1980. Taxas de transmissão de até 45Mb/s, espaçamento entre regeneradores de sinal de até 10km (menor custo quando comparado à 1km em sistemas coaxiais). Fibras Multimodo.
- Segunda Geração: entrou em operação no início da década de 1980. Faixa de $\lambda = 1.3\mu$m, onde as perdas nas fibras se tornam menores que 1dB/km. Inicialmente taxas de transmissão de até 100Mb/s em fibras multimodo. Fabricação de fibras monomodo no início da década de 1980 permitiu que, em 1987 sistemas da segunda geração atingissem taxas de 1.7Gb/s com regeneradores de sinal espaçados de 50km (perdas nas fibras tipicamente 0.5dB/km).
- Terceira Geração: Início em 1985, operando na faixa de $\lambda = 1.55\mu$m. Nesse comprimento de ondas as perdas na fibra são mínimas(0.2dB/km),

fato já realizado desde 1979. A entrada da terceira geração em operação atrasou em função da impossibilidade de compensar dispersão nessa janela óptica. Advento das fibras com dispersão deslocada permitiram a operação de sistemas a 4Gb/s, em 1985 com repetidores espaçados a 100km. Os sistemas comerciais entraram em operação a partir de 1990, com taxas de até 10Gb/s e repetidores espaçados a $60 - 70$km.

- Quarta Geração: Início na década de 1990, com o advento dos amplificadores ópticos (fibra óptica dopada com érbio-EDFA), e o sistema de transmissão WDM. Em 2001 a taxa de transmissão já era de 10Tb/s. Um sistema totalmente óptico permitiu as transmissões transcontinentais a altas taxas de transmissão (5-10 Gb/s em distâncias de 25 a 30 mil km). Sistemas WDM transmitindo 3.28Tb/s, divididos em 82 canais entre 1.45μm e 1.62μm, cada canal com 40Gb/s.

- Quinta Geração: Baseados em amplificadores Raman, sistema WDM, e na possibilidade de construir a chamada ”dry fiber”, taxas de transmissão de até 160Gb/s por canal. Faixa de 1.3 até 1.6μm. Utilização de sólitons e outras tecnologias, cristais fotônicos, sistemas totalmente ópticos.

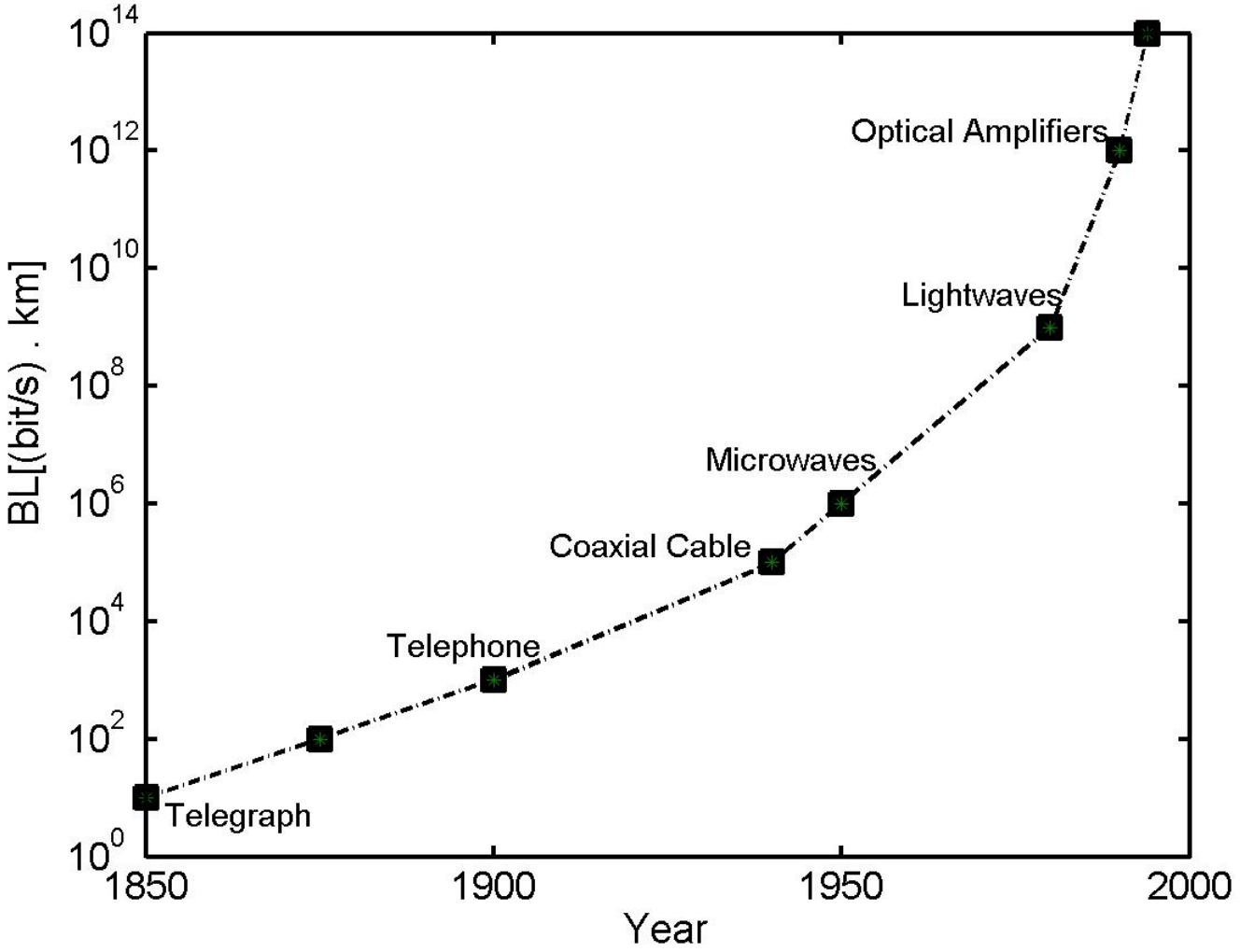

Figura 1: Evolução histórica do fator BL

Conceitos básicos

Sistemas Guiados e Não-Guiados;

Difração;

Dispersão;

Atenuação;

Formas de modulação: sinais analógicos e digitais;

Elementos de um sistema de comunicações;

Sistemas Não-Guiados

Propagação se dá em espaço ”livre”. Densidade de Potência varia na forma $S_r \propto 1/r^2$. Requer um sistema radiante (antenas). Apresenta inúmeras aplicações:

- Broadcasting de rádio e TV;
- Internet via rádio
- Telefonia Móvel Celular;
- Sistemas de Radar Civil e Militar, Sensoreamento remoto;
- Teleguiamento de objetos, aplicações militares;
- Comunicação via satélite, links de visada direta;
- Conexões locais wireless, etc;

Sistemas Guiados

A onda é guiada através de um guia de ondas(linha de transmissão, cabo coaxial, fibra óptica).

- TV a cabo
- Internet banda larga via cabo;
- Telefonia e Transmissão de Dados;
- Comunicações Transoceânicas de alta capacidade por fibra óptica;
- Transmissão de Potência em 60Hz;
- Redes locais, Redes de longas distâncias;

Difração

Em um senso bastante geral é todo e qualquer desvio e encurvamento da propagação de uma onda em relação às previsões da Óptica Geométrica.

Sempre ocorre em sistemas não-guiados, onde a densidade de potência decai na forma $1/r^2$ pelo menos, para a região de campo distante (Fraunhoffer).

É um fenômeno espacial e ocorre mesmo com uma onda monocromática (única frequência). Existem soluções não difrativas como por exemplo: onda plana uniforme, feixes de Bessel, feixes de Mathieu, etc... (na prática apenas aproximações são realizáveis).

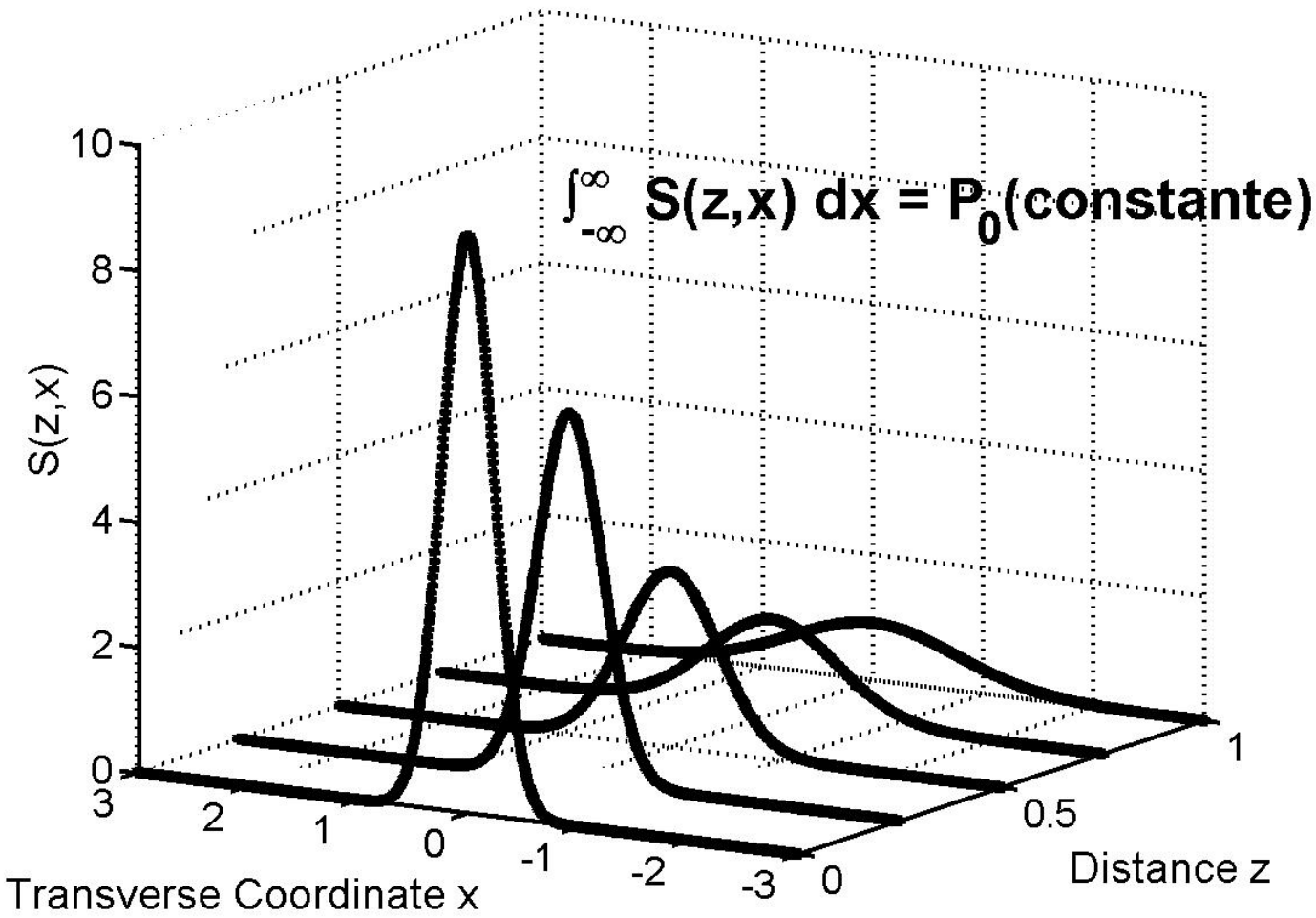

Figura 2: Fenômeno de difração em uma gaussiana.

Dispersão

É um fenômeno que ocorre no domínio do tempo, caracterizado pelo alargamento e degradação temporal de um sinal qualquer. À medida que um pulso de largura inicial τ_0 se propaga, a largura temporal τ vai aumentando (pode diminuir em algumas circunstâncias), quando o meio é dispersivo. Velocidade de propagação da onda depende da frequência.

Sempre ocorre em sistemas guiados, onde a densidade de potência é constante ao longo da seção transversal do guia, desde que este não tenha perdas por atenuação. Pode ocorrer também em sistemas não-guiados quando o meio de transmissão apresenta características dependentes da frequência.

Somente ocorre com um grupo de ondas de frequências diferentes. Requer portanto que o sinal tenha uma largura de banda de frequências.

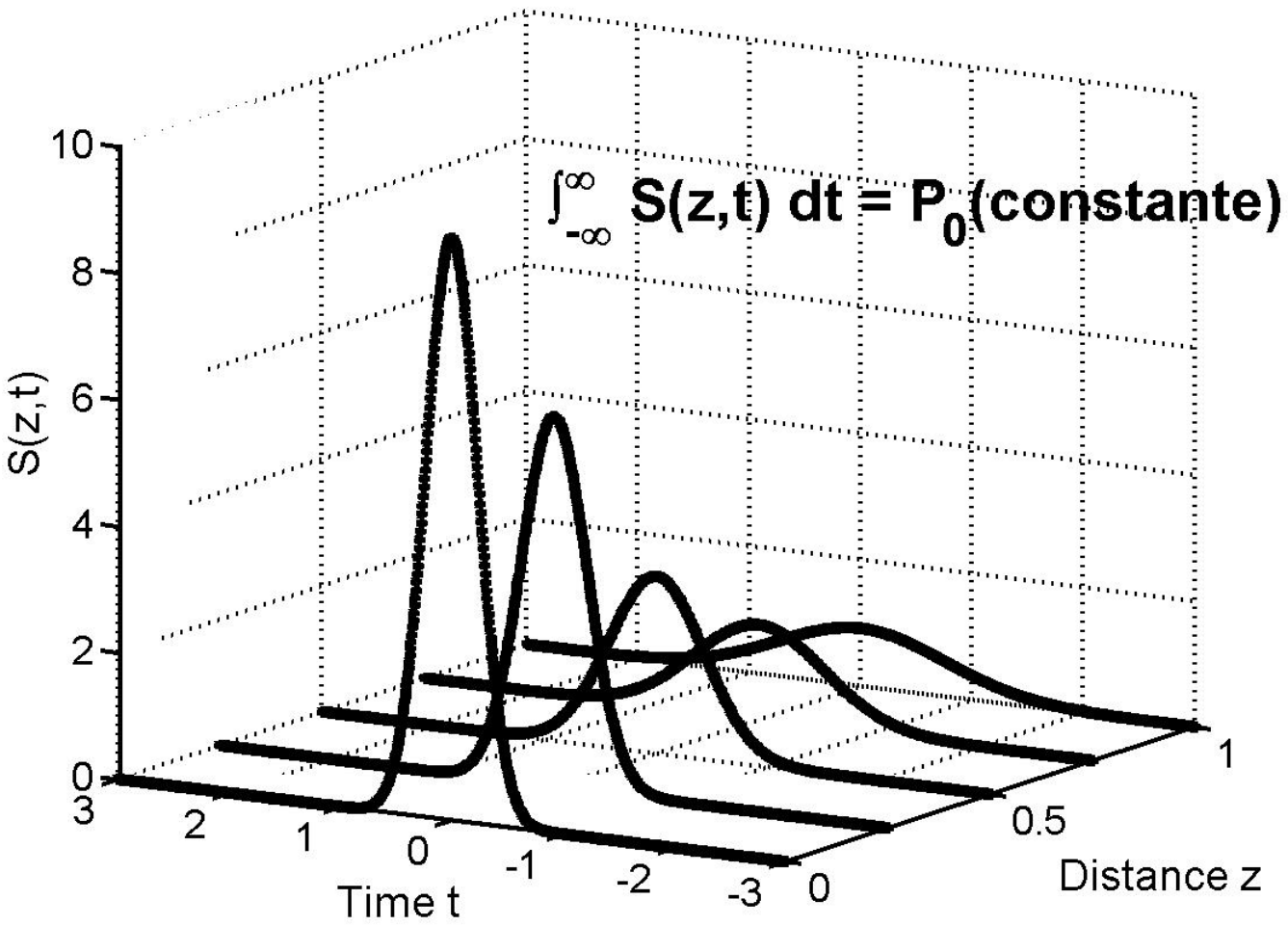

Figura 3: Fenômeno de dispersão em uma gaussiana temporal. A portadora não está sendo mostrada, apenas a envoltória.

Sinais Analógicos

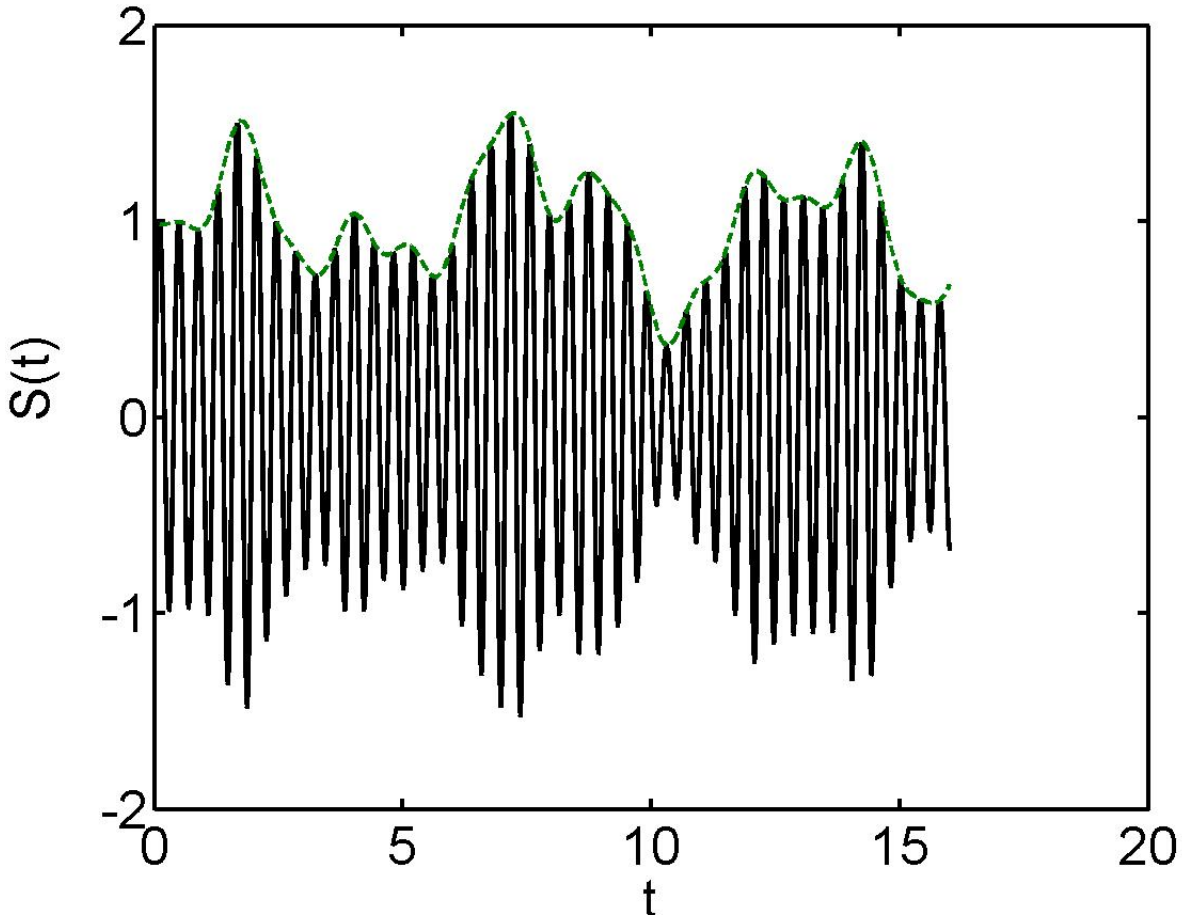

Figura 4: Sinal analógico com a portadora.

Sinais Digitais

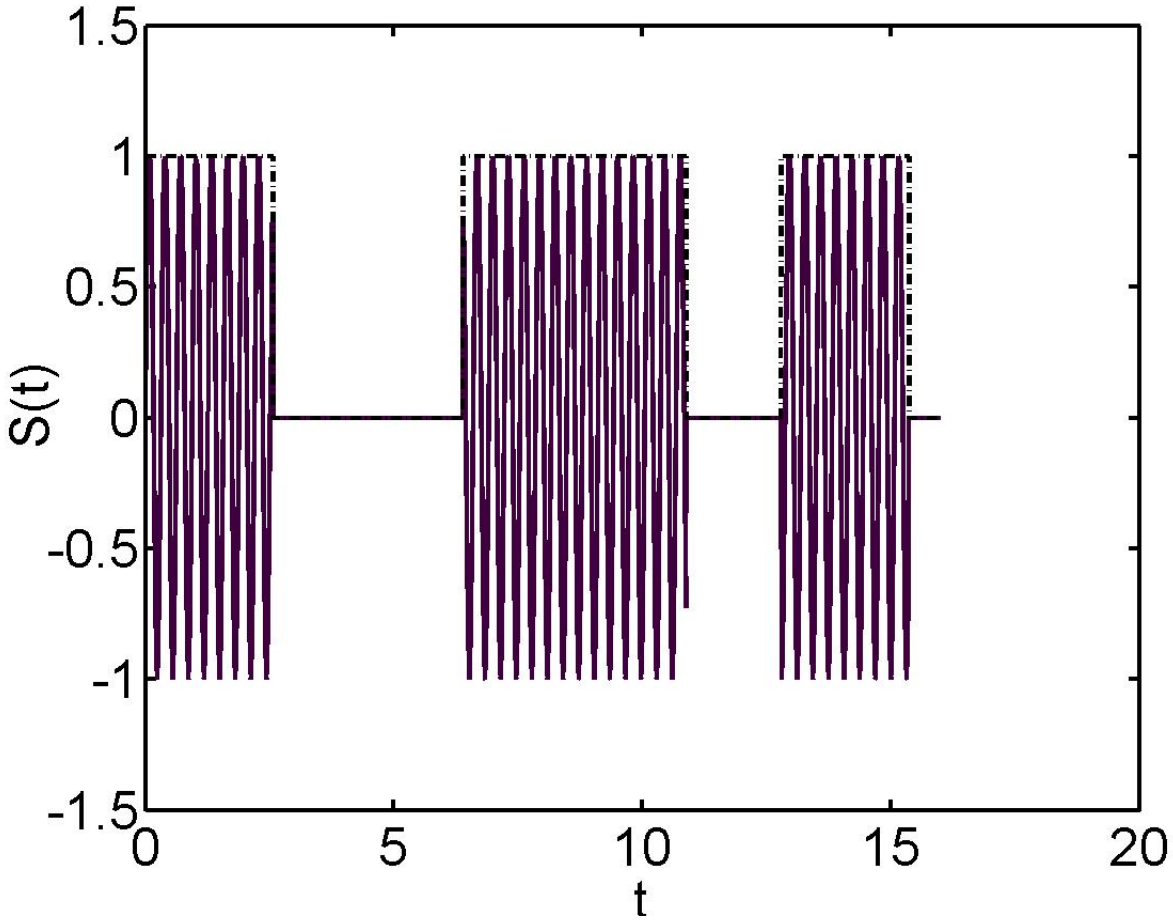

Figura 5: Sinal digital com a portadora.

Ramos de Estudo em Comunicações Ópticas

* Propagação de ondas: Análise Modal, Dispersão e Atenuação em Fibras Ópticas, empregando a teoria eletromagnética clássica.
* Dispositivos Fotônicos: Análise de dispositivos ópticos com base na teoria eletromagnética e na mecânica quântica. Aqui são estudados os acopladores, circuladores e filtros ópticos, bem como lasers, amplificadores e fotodetectores.
* Processamento de Sinais: análise de técnicas e formas de modulação do sinal de modo a otimizar os sistema sem entrar no detalhamento do funcionamento físico do sistema.

O estudo de propagação de ondas e dispositivos está na chamada ”Camada Física”do sistema de comunicação.

ESTUDO DA LUZ

O estudo da luz se dá de várias formas:

* Óptica Geométrica: primeira aproximação para a propagação. A trajetória é representada por raios;

* Ondulatória/Óptica Física: Equações de Maxwell leva em conta os efeitos difrativos, dispersivos e atenuação. Pode ou não levar em conta o caráter vetorial da luz(difração escalar não leva em conta o caráter vetorial e é aplicável em alguns casos);

* Fótons: envolve a Mecânica Quântica, para descrever a interação da luz com a matéria, onde é necessário muitas vezes levar em conta o caráter quantizado da radiação. Nesse caso as equações de Maxwell são reinterpretadas para levar em conta o quantum de energia da radiação $E_f = hf$.