

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۹۱۲.

دسته

دانشکده علوم

گروه فیزیک

(فوتونیک)

شبه سازی عددی انتشار پالسهای سالیتون در فیبرهای نوری

با در نظر گرفتن اتلاف فیبر نوری و پاشندگی مرتبه سوم

از

ابراهیم پهلوان

استاد راهنما

دکتر حمید رضا مشایخی

استاد مشاور

دکتر سعید باطبی

۱۳۸۹ / ۷ / ۳
اطلاعات در رابطه با این اثر
شبه سازی



اردیبهشت ۸۸

۱۴۱۶۲۰

تقدیم به

دو موجود مقدس،

آنان که ناتوان شدند تا من به توانایی برسم،

مویشان سپید گشت تا من در اجتماع رو سپید شوم

و عاشقانه موختند تا رو شکر را هم باشند و کرم بخش وجودم

پدرم و مادرم.

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که می رود ممد حیات است و چون بر می آید مفرح ذات، پس در هر نفسی دو نعمت و بر هر نعمت شکری واجب. از دست و زیان که بر آید کز عهده‌ی شکرش به در آید.

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم که از استاد بزرگوار جناب دکتر حمید رضا مشایخی که بنده را در انجام این پروژه راهنمایی و مساعدت نمودند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. از جناب دکتر سعید باطبی، استاد مشاور بنده، نهایت سپاس و تشکر را دارم و همچنین مراتب سپاسگزاری خود را خدمت اساتید محترم جناب دکتر رحیم‌پور و دکتر رجایی که در سمت اساتید ممتحن زحمت مطالعه پایان‌نامه را تقبل نمودند عرض می‌دارم. در نهایت از خانواده مهربان و دلسوزم که همواره حامی و پشتیبانم بودند و همچنین دوستان عزیزم کمال سپاس و تشکر را دارم و برای ایشان از درگاه خداوند باری تعالی بهروزی و سعادت خواستارم.

فهرست مطالب

صفحه		عنوان
ح		چکیده فارسی
خ		چکیده انگلیسی
۱		مقدمه
۳	مروری بر تاریخچه مخابرات	فصل ۱
۴	چشم انداز تاریخی	۱-۱
۵	نیاز به ارتباطات فیبر نوری	۱-۱-۱
۸	تکامل سیستم های نور موج	۲-۱-۱
۱۳	ظهور سالیتون های نوری	۲-۱
۱۳	سیستم های ارتباط نوری	۳-۱
۱۶	سیستم های سالیتونی	فصل ۲
۱۷	اتلاف فیبر	۱-۲
۱۷	ضریب تضعیف	۱-۱-۲
۱۹	جذب مادی	۲-۱-۲
۲۰	پراکنندگی رالی	۳-۱-۲
۲۱	نقص های موجبری	۲-۲
۲۲	اثر نوری کر	۲-۲-۱
۲۶	معادله ی غیرخطی شرودینگر	۳-۲
۳۰	سالیتون های فیبری	۴-۲
۳۱	سالیتون های روشن	۱-۴-۲
۳۶	سالیتون های تاریک	۲-۴-۲
۳۸	ارتباطات بر پایه ی سالیتون	۲-۵
۳۸	انتقال اطلاعات با سالیتون ها	۱-۵-۲
۴۰	برهم کنش سالیتونی	۲-۵-۲
۴۲	چرپ فرکانسی	۲-۵-۳
۴۴	جوابهای عددی معادله غیرخطی شرودینگر	فصل ۳
۴۵	چرا از روش تقسیم گام فوریه استفاده می کنیم؟	۱-۳
۴۶	روش تقسیم گام فوریه	۲-۳
۴۸	خطاهای روش تقسیم گام فوریه	۳-۳
۴۹	روش تقسیم گام فوریه متقارن	۴-۳
۵۰	اجرای کد	۵-۳

۵۲	شیشه‌سازی سالیتون‌ها	فصل ۴
۵۳	انتشار سالیتون‌ها	۱-۴
۵۵	توجیه رفتار پالس مرتبه دو	۲-۴
۵۶	برهم‌کنش سالیتون‌ها	۱-۲-۴
۵۷	تأثیر کاهش فاصله‌زمانی بین دو پالس سالیتون روی برهم‌کنش متقابل آن دو	۲-۲-۴
۵۹	تعمیم فرایند به سالیتون مرتبه سه	۳-۲-۴
۶۰	تغییر طول برهم‌کنش بر حسب جدایی زمانی دو سالیتون	۳-۴
۶۰	رابطه محل برهم‌کنش با فاصله زمانی بین دو پالس	۴-۴
۶۲	انتشار پالسهای با مراتب بالاتر	۵-۴
۶۴	تأثیر پاشندگی مرتبه سه بر انتشار سالیتون پایه	۶-۴
۶۶	تأثیر پاشندگی مرتبه سه بر انتشار سالیتون‌های مرتبه دو و سه	۷-۴
۶۶	اتلاف	۸-۴
۶۷	سالیتون‌های اتلاف-مدیریت‌شده	۹-۴
۷۰	سالیتون‌های پاشندگی-مدیریت‌شده	۴-۱۰
۷۸	نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای ادامه کار	فصل ۵
۷۹	نتیجه‌گیری	۱-۵
۸۰	پیشنهاد برای ادامه کار	۲-۵
۸۱		مراجع
۸۵		پیوست

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ نمایش طرحواره‌ی تلگراف نوری و مخترع آن کلود چپ	۵
شکل ۲-۱ افزایش حاصلضرب نرخ‌بیت-فاصله در طول دوره‌ی ۲۰۰۰-۱۸۵۰	۷
شکل ۳-۱ افزایش ظرفیت سیستم‌های نورموجی محقق‌شده بعد از سال ۱۹۸۰. سیستم‌های تجاری (دایره‌ها) بعد از عملیات تحقیقاتی (مربع‌ها) با چند سالی تاخیر آمده‌اند.	۸
شکل ۴-۱ افزایش حاصلضرب BL در دوره‌ی ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۰ بواسطه‌ی چندین نسل از سیستم‌های نورموجی. علائم متفاوت برای نسل‌های متوالی بکار گرفته شده‌اند.	۹
شکل ۵-۱ شبکه‌ی بین‌المللی زیردریایی سیستم‌های ارتباط فیبرنوری حوالی سال ۲۰۰۰	۱۲
شکل ۶-۱ سیستم ارتباط نوری نوعی	۱۵
شکل ۱-۲ طیف اتلاف برای فیبر تک-مد تولید شده در ۱۹۷۹	۱۸
شکل ۲-۲ اتلاف و پاشندگی فیبر تمام‌موج $AllWave$	۲۰
شکل ۳-۲ نمایش فاصله‌ی $walk-off$	۲۵
شکل ۴-۲ نمایش تولید باندهای کناری در سیستم دو کانالی	۲۶
شکل ۵-۲ پیشروی سالیون‌های مرتبه اول (ستون چپ) و مرتبه سوم (ستون راست) بر یک دوره‌ی سالیونی. دریف‌های بالا و پایین شکل پالس و پروفایل چرپ آن را به ترتیب نشان می‌دهند.	۳۲
شکل ۶-۲ پیشروی یک پالس گوسی با $N=1$ بر محدوده‌ی $\xi=0-12$	۳۴
شکل ۷-۲ پیشروی پالس برای پالس « $sech$ » با $N=12$ بر محدوده‌ی $\xi=0-12$	۳۵
شکل ۸-۲ پروفایل‌های (الف) شدت و (ب) فاز سالیون‌های تاریک برای چند مقدار فاز داخلی ϕ	۳۶
شکل ۹-۲ رشته بیت سالیونی در فرمت RZ	۳۹
شکل ۱۰-۲ پیشروی یک زوج سالیون در ۶۵ طول پاشندگی که نشان دهنده‌ی آثار برهم‌کنش سالیونی برای چهار انتخاب متفاوت نسبت r و فاز نسبی θ آورده شده است. فاصله‌ی اولیه در هر چهار مورد $q_0 = 3$	۴۰
شکل ۱۱-۲ پروفایل پالس ورودی چرپ شده در فضای زمان (ردیف بالا)؛ در فضای فرکانس (ردیف پایین)	۴۲
شکل ۱۲-۲ (الف) پیشروی یک پالس نوری چرپ شده برای مورد $N=1$ و $C=0.5$ (ب) برای $C=0$ شکل پالس تغییر نمی‌کند، و پالس بصورت یک سالیون پایه انتشار می‌یابد.	۴۳
شکل ۱-۳ $SSFM$ برای یک تکرار از گام h که در $z=(j-1)h$ آغاز شده است.	۴۷
شکل ۲-۳: شماتیک یک گام از $SSFM$ متقارن.	۴۹
شکل ۳-۳ ماتریس شبکه نشان‌دهنده‌ی صفحه‌ی فضا-زمان (z,t)	۵۱
شکل ۴-۳ (الف) پالس تزریقی $U(t)$ ، (ب) انتقال فوری، $fft(U)$ (ج) تصحیح انتقال فوری $fftshift(fft(U))$	۵۱
شکل ۱-۴ انتشار سالیون پایه در فیبر بدون اتلاف در طول یک دوره‌ی سالیونی.	۵۳
شکل ۲-۴ انتشار پالس سالیون مرتبه دو در فیبر بدون اتلاف در طول یک دوره‌ی سالیونی.	۵۴
شکل ۳-۴ انتشار پالس سالیون مرتبه سه در فیبر بدون اتلاف در طول یک دوره‌ی سالیونی.	۵۴

- شکل ۴-۴ انتشار پالس سالیتون مرتبه دو در طول پنج دوره‌ی سالیتونی (فیبر بدون اتلاف)..... ۵۵
- شکل ۴-۵ انتشار دو پالس سالیتون پایه با فاصله‌زمانی $t_0 = 10t_0$ در طول بیست دوره..... ۵۶
- شکل ۴-۶ انتشار دو پالس سالیتون پایه با فاصله‌زمانی $t_0 = 5t_0$ در طول بیست دوره..... ۵۷
- شکل ۴-۷ نمایش تغییر شکل برهم‌کنش دو پالس سالیتون پایه نسبت به کاهش فاصله‌زمانی بین آنها در طول ۵ دوره..... ۵۸
- شکل ۴-۸ نمایش تغییر شکل برهم‌کنش سه پالس سالیتون پایه نسبت به کاهش فاصله‌زمانی بین سه پالس..... ۵۹
- شکل ۴-۹ (الف) پیشروی زمانی برهم‌کنش دو پالس سالیتونی به فاصله‌زمانی $t_0 = 8t_0$ ۶۰
- شکل ۴-۱۰ قله‌ی حاصل از برهم‌کنش دو پالس پایه به فاصله‌زمانی $t_0 = 8t_0$ که در $47L_0$ تشکیل شده است..... ۶۱
- شکل ۴-۱۱ برون‌یابی نمودار تا حداقل فاصله‌زمانی دو پالس ($q=0$)..... ۶۱
- شکل ۴-۱۲ پروفایل شدت پالسهای تزریقی (پالسهای قرمز و سبز) و پالس برآیند (آبی)..... ۶۲
- شکل ۴-۱۳ شبیه‌سازی انتشار پالس سالیتون مرتبه چهار در طول یک دوره‌ی سالیتونی..... ۶۳
- شکل ۴-۱۴ شبیه‌سازی انتشار پالس سالیتون مرتبه پنج در طول یک دوره‌ی سالیتونی..... ۶۳
- شکل ۴-۱۵ شبیه‌سازی انتشار پالس سالیتون مرتبه شش در طول یک دوره‌ی سالیتونی..... ۶۴
- شکل ۴-۱۶ انتشار پالس سالیتونی با پهنای زمانی ۱ ps ($\beta_p = 0.1$)..... ۶۴
- شکل ۴-۱۷ انتشار پالس سالیتونی با پهنای زمانی ۰.۱ ps ($\beta_p = 0.1$)..... ۶۵
- شکل ۴-۱۸ انتشار پالس سالیتونی با پهنای زمانی ۰.۰۱ ps ($\beta_p = 0.1$)..... ۶۵
- شکل ۴-۱۹ تاثیر پاشندگی مرتبه سه بر سالیتون‌های الف (مرتبه دو و ب) مرتبه سه به ازای $\beta_p = 0.1$ ($t_0 = 10fs$)..... ۶۶
- شکل ۴-۲۰ انتشار پالس سالیتون مرتبه یک در طول چهار دوره‌ی سالیتونی با در نظر گرفتن اتلاف ($\alpha = 0.2 dB/km$)..... ۶۷
- شکل ۴-۲۱ (الف) انتشار پالس سالیتونی (ب) پهن‌شدگی سالیتون پایه، افزایش T_{FWHM} در طول انتشار..... ۶۸
- شکل ۴-۲۲ تضعیف و تقویت دوره‌ای سالیتون‌ها (الف) $z/L_{amp} = 1$ (ب) $z/L_{amp} = 5$ ۶۹
- شکل ۴-۲۳ تضعیف و تقویت دوره‌ای سالیتون‌ها در حالت $L_{amp} = 8z_0$ (الف) $z/L_{amp} = 1$ (ب) $z/L_{amp} = 5$ ۶۹
- شکل ۴-۲۴ تضعیف و تقویت دوره‌ای سالیتون‌ها در حالت $L_{amp} \gg 8z_0$ (الف) $z/L_{amp} = 1$ (ب) $z/L_{amp} = 5$ ۷۰
- شکل ۴-۲۵ شماتیک کلی نقشه‌ی پاشندگی در فیبرهای پاشندگی مدیریت‌شده..... ۷۰
- شکل ۴-۲۶ انتشار پالس سالیتونی در طول (الف) یک واحد پاشندگی (ب) ۲۵ واحد پاشندگی..... ۷۱
- شکل ۴-۲۷ تغییرات پهنای پالس برای نقشه‌های مختلف پاشندگی. ($t_0 = 10ps$; $\gamma = 3.4 W^{-1} km^{-1}$)..... ۷۲
- شکل ۴-۲۸ تاثیر نقشه‌های مختلف بر نوسانات پالس سالیتون پایه در طول یک واحد پاشندگی..... ۷۲
- شکل ۴-۲۹ تاثیر نقشه‌های مختلف بر برهم‌کنش دو پالس سالیتونی..... ۷۳
- شکل ۴-۳۰ تاثیر نقشه‌های مختلف بر نوسانات پالس سالیتونی در طول یک سلول پاشندگی..... ۷۵
- شکل ۴-۳۱ (ردیف بالا) انتشار پالس سالیتونی در طول ۵۰ واحد پاشندگی، (ردیف پایین) تغییرات پهنای پالس..... ۷۶
- شکل ۴-۳۲ (الف) انتشار پالس سالیتونی در رژیم پاشندگی با $\beta_p^{av} < 0$ (ب) پارامتر T_{FWHM} بر حسب طول انتشار..... ۷۷
- شکل ۴-۳۳ انتشار پالس سالیتون پایه در رژیم پاشندگی با $\beta_p^{av} > 0$ ۷۷

شبیه سازی عددی انتشار پالسهای سالیتون در فیبرهای نوری با در نظر گرفتن اتلاف فیبر نوری و پاشندگی مرتبه سوم.

ابراهیم پهلوان

پالسهای نوری با شدت زیاد (توابع سکانت مانند از زمان) پالسهای سالیتون نامیده می‌شوند. انتشار این پالسها در فیبرهای نوری باعث می‌شود که دو اثر پاشندگی ($Dispersion$) و اثر غیرخطی ضریب شکست ($Kerr\ effect$) یکدیگر را خنثی کرده و در نتیجه این پالسها بدون از دست دادن شکل خود در فیبر نوری منتشر شوند. این ویژگی باعث شده است تا این پالسها کاندیدای خوبی برای ارسال اطلاعات در سیستم مخابرات نوری برای مسافت‌های زیاد باشند. انتشار این پالسها در فیبرهای نوری دستخوش اتلاف فیبر نوری و پاشندگی می‌شود. هدف این پایان‌نامه بررسی این پارامترها بر روی انتشار پالسهای سالیتونی می‌باشد که نیاز به حل معادله غیر خطی شرودینگر دارد که در آن پارامترهای اتلاف و پاشندگی مرتبه سوم لحاظ شده باشد.

واژه‌های کلیدی: شبیه سازی عددی، پالس سالیتون، NLSE، فیبرهای نوری، اتلاف فیبر، پاشندگی مرتبه سوم.

Abstract

Numerical simulation of the propagation of Soliton pulses in optical fiber having considered the fiber loss and third order dispersion.

Ebrahim Pahlavan

Optical pulses with high intensity (sech-like functions of time) are known as Soliton. As a result of compensation of the dispersion with nonlinear effects, these pulses propagate in optical fibers without any change in their shape. This property makes them a good candidate for transferring information for long distance optical communication systems. The purpose of this thesis is to investigate the effects of loss and third-order dispersion on the propagation of optical solitons. To do this, we solve the nonlinear Schrodinger equation (NLSE) by using the split-step Fourier method (SSFM).

Keywords: Numerical simulation, Soliton pulse, NLSE, Optical fibers, Fiber loss, Third-order dispersion.

دانشکده علوم

فوتونیک - فیزیک

سایتون‌های نوری

مقدمه

اردیبهشت ۸۸

دانشگاه گیلان

پایان نامه کارشناسی ارشد

شبیه‌سازی انتشار پالس نوری یکی از راه‌های مطالعه‌ی تاثیر محیط و اثرات اپتیکی بر آن است. از این میان شبیه‌سازی پالسهای سالیتمونی از عمده مسائل مورد توجه در سالهای اخیر می‌باشد. سالیتمون به موجی گفته می‌شود که به صورتی منفرد با شکل، ارتفاع، و سرعت ثابت به پیشروی و انتشار خود در محیط ادامه می‌دهند. سالیتمونها حاصل تعادلی ظریف بین آثار غیرخطی و پاشندگی هستند که در مورد برخی از پدیده‌های فیزیکی و در پاره‌ای از محیطها پدید می‌آیند. تاریخچه و اهمیت مقدمات دست‌یابی به دانش مدل‌سازی ریاضی سالیتمونها به تنظیم معادلات حاکم بر دینامیک امواج بلند آب توسط بوسینسک در سال ۱۸۷۲ باز می‌گردد. معادله کورتوگ-دوریز در سال ۱۸۹۵ از معادلات بوسینسک مشتق گردیده و به عنوان مدلی ریاضی برای سیر یک جهتی امواج بلند آب ارائه شد. سرانجام در پی ابداع و مطالعات مربوط به معادلات بوسینسک و کورتوگ-دوریز، اکتشاف و نمایش عددی برهم‌کنش سالیتمونها از جمله‌ی اساسی‌ترین توفیقات علمی انسان در اواسط قرن بیستم میلادی به‌شمار می‌آید (کروسکال و زابوسکی ۱۹۶۵). سالیتمونها در زمینه‌های گوناگونی از اپتیک و سیالات گرفته تا حالت جامد و سیستم‌های شیمیایی دیده شده و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

در این پایان‌نامه بیشتر جنبه‌ی پدیده‌شناختی امواج سالیتمونی در اپتیک غیرخطی مد نظر است. از اینرو با دقت در رفتار متفاوت سالیتمونهای مراتب مختلف پاسخی برای این اختلاف ارائه می‌شود. برای مطالعه‌ی رفتار سالیتمونها نیاز به حل عددی معادله غیرخطی شرودینگر است که برای حل آن از روش تقسیم‌گام فوری استفاده شده است. سرعت محاسبه‌ی این روش نسبت به دیگر روشهای عددی نظیر روشهای صریح و ضمنی بیشتر و کد نویسی آن راحت‌تر است. برای حصول این مهم در بخشهای آتی روند منطقی‌ای را برای معرفی سالیتمونها آورده‌ایم. فصل اول در بر گیرنده‌ی مروری کوتاه بر تاریخچه‌ی مخابرات می‌باشد که در نهایت ظهور سالیتمونهای اپتیکی را بعنوان جهشی در این سیستم‌ها معرفی می‌سازد. در فصل دوم به معرفی سیستم‌های سالیتمونی با تفصیل بیشتری پرداخته می‌شود، ابتدا خواص محیطی فیبرنوری که حامل پالسهای سالیتمونی است به اجمال آورده می‌شود؛ بعد معادله‌ی حاکم بر سالیتمونهای اپتیکی معرفی و شکل ساده‌ی شده‌ی آن بررسی می‌شود. فصل سوم به معرفی یکی از روش‌های عددی حل معادله غیرخطی شرودینگر، روش تقسیم‌گام فوری، اختصاص دارد. در فصل چهارم شبیه‌سازی‌های انجام شده آورده شده است. و در نهایت در فصل پنجم جمع‌بندی و نتایج حاصل را ارائه نموده و پیشنهادهایی جهت ادامه کار مطرح می‌شود.

دانشکده علوم

فوتونیک - فیزیک

سایتون‌های نوری

فصل ۱

مروری بر تاریخچه مخاپرات

اردیبهشت ۸۸

دانشگاه گیلان

پایان نامه کارشناسی ارشد

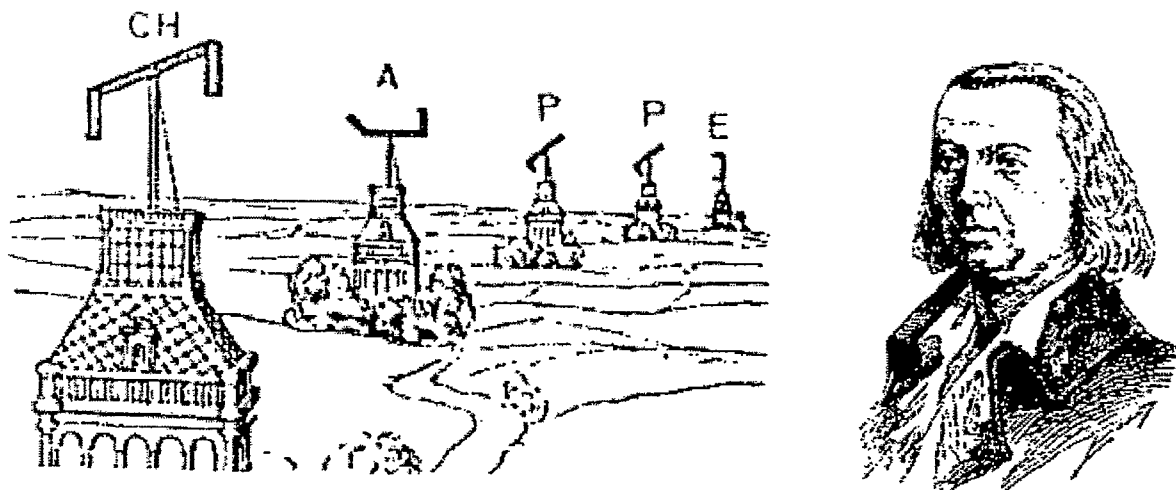
یک سیستم ارتباطی اطلاعات را از مکانی به مکان دیگر انتقال می‌دهد، چه فاصله بین دو مکان چند کیلومتر بوده یا مسافتی بین اقیانوسی باشد. اغلب، اطلاعات بوسیله‌ی یک موج الکترومغناطیسی حامل که فرکانسش می‌تواند از چند مگاهرتز تا چندین تراهرتز تغییر کند حمل می‌شوند. سیستم‌های ارتباط نوری از فرکانسهای بالای حامل (~ 100 THz) در ناحیه‌ی مرئی یا نزدیک مادون قرمز در طیف الکترومغناطیسی استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها گاهی سیستم‌های نورموجی خوانده می‌شوند تا از سیستم‌های میکروموج، که فرکانس حامل‌شان بطور معمول پنج مرتبه بزرگی کوچکتر است (~ 1 GHz)، تمیز داده شوند. سیستم‌های فیبرنوری سیستم‌های نورموجی‌ای هستند که از فیبرهای نوری برای انتقال اطلاعات بهره می‌برند. چنین سیستم‌هایی از سال ۱۹۸۰ در سطح جهانی گسترش یافتند و حقیقتاً در فن‌آوری ارتباطات از دور انقلابی بوجود آوردند. در واقع، معتقدند که فن‌آوری نورموجی همراه با فن‌آوری میکروالکترونیک عامل اصلی در ظهور «عصر اطلاعات» هستند. هدف این مقدمه تأمین پیش‌زمینه‌ای مختصر برای فصل‌های آتی می‌باشد. بخش ۱-۱ چشم‌اندازی تاریخی بر پیشرفت سیستم‌های ارتباط نوری دارد. بخش ۲-۱ ظهور و مبنای استفاده از پالس‌های سالیونی را پوشش می‌دهد. مزایای چنین پالس‌هایی را در بخش ۳-۱ بحث می‌کنیم.

۱-۱ چشم‌انداز تاریخی

اگر ارتباطات نوری را از چشم‌اندازی وسیع نظاره کنیم، استفاده از نور برای اهداف ارتباطی به عهد عتیق برمی‌گردد [۱]. اغلب تمدن‌ها از آینه‌ها، برج‌های آتش، یا علائم دود برای ارسال قسمتی منفرد از اطلاعات (نظیر پیروزی در جنگ) استفاده می‌کردند. اساساً ایده‌ی یکسانی در پایان قرن هجدهم بوسیله لامپ‌های علامت‌دهی، پرچم‌ها، و دیگر وسایل مخابره بکار گرفته شد. پیرو پیشنهاد کلود چیب^۱ در ۱۷۹۲ ایده انتقال مکانیکی پیام‌های کد شده در فواصل طولانی (~ 100 km) گسترش یافت؛ آن هم بوسیله ایستگاه‌های واسطه برای تقویت [۲]، که به زبان امروزی بعنوان بازتولیدکننده‌ها یا تکرارکننده‌ها عمل می‌کنند. شکل ۱-۱ ایده‌ی پایه را بطور شماتیک نشان می‌دهد. اولین بار یک چنین «تلگراف نوری» بین پاریس و لیل (دو شهر فرانسه که 200 km از هم فاصله داشتند) در ژوئیه ۱۷۹۴ بکار گرفته شد. در ۱۸۳۰ شبکه در اروپا توسعه داده شد [۱].

^۱ Claude Chappe

نقش نور در چنین سیستم‌هایی به سادگی ظاهر ساختن سیگنال‌های کد شده بود بطوریکه آنها را بتوان بوسیله ایستگاه‌های تقویت تفسیر کرد. سیستم‌های ارتباطی اپتومکانیکی قرن نوزدهم بطور ذاتی کند بودند. در فن‌آوری مدرن روز، نرخ بیت یک چنین سیستم‌هایی کمتر از ۱ بیت بر ثانیه ($B < 1 \text{ b/s}$) بود.



شکل ۱-۱ نمایش طرحواره‌ی تلگراف نوری و مخترع آن کلود چیب.

۱-۱-۱ نیاز به ارتباطات فیبر نوری

ظهور تلگراف در دهه‌ی ۱۸۳۰ استفاده از جریان الکتریسته را جایگزین استفاده از نور کرد و عصر ارتباطات الکتریکی آغاز شد [۳]. با استفاده از تکنیک‌های جدید کدگذاری، نظیر کد مورس^۱، نرخ بیت B توانست تا 10 b/s افزایش یابد. استفاده از ایستگاه‌های واسطه تقویت برقراری ارتباط را در مسافت‌های طولانی ($\sim 100 \text{ km}$) محقق ساخت. بعلاوه اولین کابل تلگراف در ۱۸۶۶ بین اقیانوس آتلانتیک با موفقیت بکار گرفته شد. تلگراف در اساس از یک الگوی دیجیتالی بواسطه‌ی دو پالس الکتریکی با مدت‌های متفاوت (نقطه‌ها و خط‌های کد مورس) استفاده می‌کرد. اختراع تلگراف در ۱۸۷۶ تغییری بزرگ ایجاد کرد تا جاییکه پالس‌های الکتریکی از میان یک جریان الکتریکی متغیر بشکل آنالوگ انتقال می‌یافتند [۴]. تکنیک‌های الکتریکی آنالوگ برای یک قرن یا بیشتر در سیستم‌های ارتباطی حاکم شدند.

گسترش شبکه‌های تلفن جهانی در طول قرن بیستم ما را به سوی پیشرفتهای شایان توجه‌ای در طراحی سیستم‌های ارتباط الکتریکی رهنمون ساخت. استفاده از کابل‌های هم‌محور به‌جای جفت‌سیم‌ها ظرفیت سیستم را بطور قابل توجه‌ای بالا

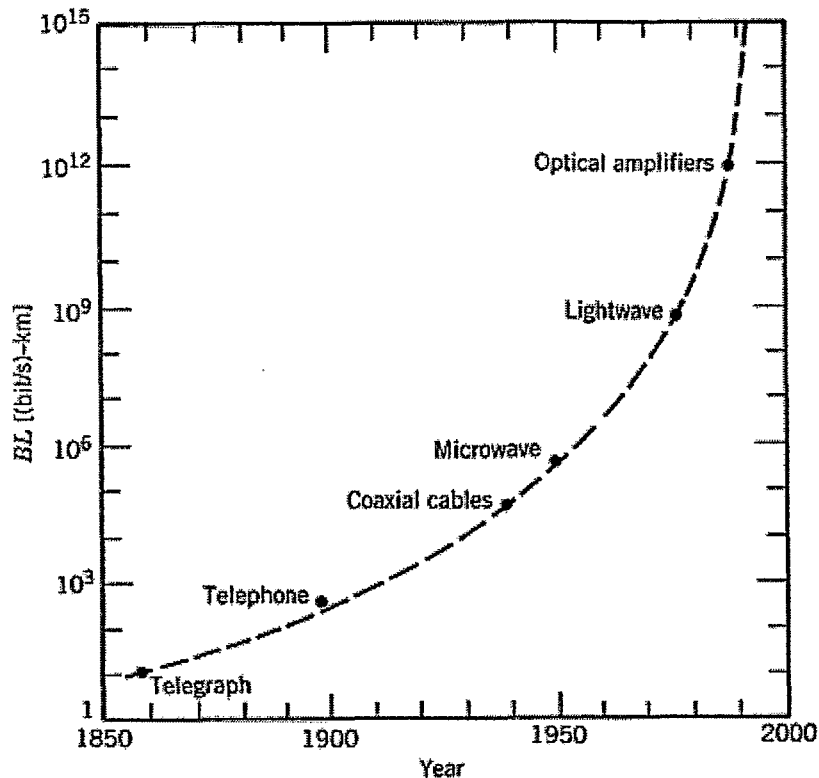
¹ Morse code

فصل ۱ مروری بر تاریخچه مخابرات

برد. اولین سیستم کابل هم‌محور، که در سال ۱۹۴۰ بکار گرفته شد، یک سیستم ۳ MHz ی بود که توانایی انتقال ۳۰۰ کانال صوتی یا یک کانال منفرد تلویزیونی داشت. پهنای باند چنین سیستم‌هایی با اتلاف‌های وابسته به فرکانس کابل محدود می‌شد، که به سرعت به ازای فرکانس‌های بالای ۱۰ MHz افزایش می‌یافت. این محدودیت منجر به پیشرفت سیستم‌های ارتباط میکروموج شد که در آن یک موج الکترومغناطیسی حامل با فرکانسهایی در محدوده‌ی ۱-۱۰ GHz بوسیله‌ی روش‌های مدولاسیون مناسب برای انتقال سیگنال بکار گرفته شد.

اولین سیستم میکروموج در فرکانس حامل ۴ GHz به سال ۱۹۴۸ بکار گرفته شد. از آن زمان هردوی سیستم‌های محوری و میکروموج بطور قابل ملاحظه‌ای نمو یافتند و قادر به کار در نرخیت 100 Mb/s شدند. اغلب سیستم‌های محوری پیشرفته به سال ۱۹۷۵ بکار گرفته شدند و در نرخیت 274 Mb/s کار می‌کردند. یک اشکال عمده‌ی چنین سیستم‌های سرعت‌بالای محوری کم‌بودن فاصله تکرارکننده ($\sim 1 \text{ km}$) بود، که باعث می‌شد هزینه‌ی کار سیستم بالا رود. سیستم‌های ارتباطی میکروموج معمولاً امکان فاصله‌گذاری بزرگی را برای تکرارکننده فراهم می‌ساخت، اما از طرفی نرخیت‌شان با فرکانس حامل چنین امواجی محدود می‌شد. یک نشانه‌ی معمول مزیت سیستم‌های ارتباطی حاصلضرب نرخیت-فاصله، BL است که B معرف نرخیت و L فاصله‌ی تکرارکننده است. شکل ۱-۲ نشان می‌دهد که چگونه حاصلضرب BL با پیشرفتهای فن‌آورانه‌ی یک قرن و نیم اخیر افزایش یافته است. سیستم‌های ارتباطی با (Mb/s) $100 \text{ km} \sim BL$ به سال ۱۹۷۰ در دسترس بودند و بخاطر محدودیت‌های اساسی به چنین مقادیری محدود می‌شدند.

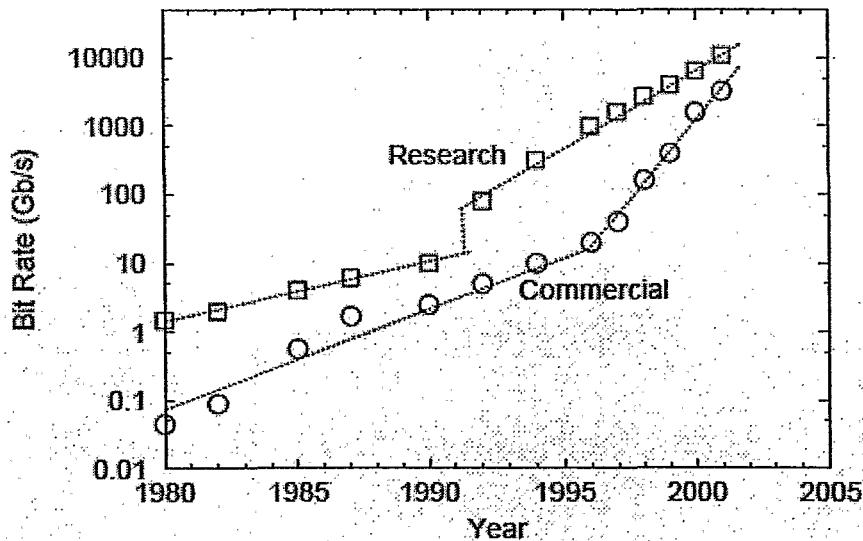
در طول نیمه‌ی دوم قرن بیستم مشخص شد که اگر از امواج نوری به عنوان حامل استفاده شود افزایشی به اندازه‌ی چند مرتبه بزرگی در حاصلضرب BL ممکن خواهد بود. با این حال در طول دهه‌ی ۱۹۵۰ نه یک منبع نوری هم‌دوس و نه یک محیط مناسب انتقال در دسترس نبود. اختراع لیزر و نمایش آن در ۱۹۶۰ اولین مشکل را حل کرد [۵]. سپس توجه بر یافتن راه‌هایی برای استفاده از نور لیزر در ارتباطات نوری متمرکز شد. ایده‌های بسیاری در طول دهه‌ی ۱۹۶۰ طرح شدند [۶]، بیشترین ایده‌ی مورد توجه محدود ساختن نور با استفاده از توالی عدسی‌های گازی بود [۷].



شکل ۱-۲ افزایش حاصلضرب نرخیت-فاصله در طول دوره‌ی ۱۸۵۰-۲۰۰۰. ظهور یک فن‌آوری جدید با دایره‌ی توپر نشان داده شده است.

در سال ۱۹۶۶ پیشنهاد شد که فیبرهای نوری می‌توانند بهترین گزینه باشند [۸]، بخاطر اینکه قادر به هدایت نور به شیوه‌ای نظیر هدایت الکترون‌ها در سیم‌های مسی بودند. مشکل اصلی اتلاف بالای فیبرهای نوری بود - فیبرهای در دسترس در دهه‌ی ۱۹۶۰ اتلاfi بالغ بر ۱۰۰۰ dB/km داشتند. در ۱۹۷۰، زمانیکه اتلاف‌های فیبر توانستند در ناحیه‌ی طول‌موج نزدیک ۱ μm تا زیر ۲۰ dB/km کاهش یابند، شکستی رخ داد [۹]. در همان زمان لیزرهای نیمه رسانای GaAs که بطور پیوسته در دمای اتاق کار می‌کردند نمایش داده شدند [۱۰]. دسترسی همزمان به منابع نوری فشرده و فیبرهای نوری/اتلاف‌پایین منجر به کوششی جهانی برای گسترش سیستم‌های ارتباط فیبرنوری شد [۱۱]. شکل ۱-۳ افزایش ظرفیت سیستم‌های نورموجی را که از سال ۱۹۸۰ در طول چندین دوره‌ی پیشرفت محقق شده نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود توسعه‌ی تجاری سیستم‌های نورموجی بدقت پیرو مرحله‌ی تحقیق و توسعه است. از روی افزایش نرخیت با فاکتور ۱۰۰۰۰ در دوره‌ای کمتر از ۲۵ سال آشکارا سرعت ترقی مشهود است. فواصل انتقال نیز از ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ km در همان دوره‌ی زمانی افزایش می‌یابند.

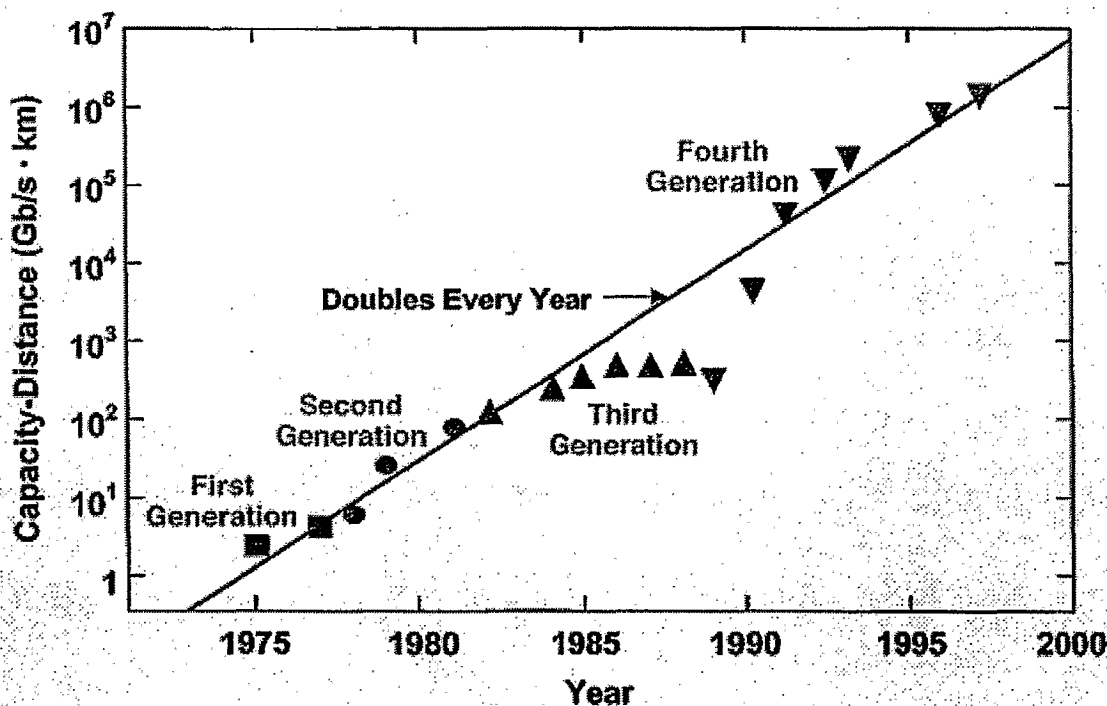
در نتیجه حاصلضرب نرخیت-فاصله برای سیستم‌های نورموجی مدرن با فاکتوری از مرتبه‌ی 10^7 نسبت به سیستم‌های نورموجی اولیه رشد یافته است.



شکل ۳-۱ افزایش ظرفیت سیستم‌های نورموجی محقق‌شده بعد از سال ۱۹۸۰. سیستم‌های تجاری (دایره‌ها) بعد از عملیات تحقیقاتی (مربع‌ها) با چند سالی تاخیر آمده‌اند. تغییر در شیب بعد از سال ۱۹۹۲ بخاطر اختراع فن‌آوری WDM است.

۲-۱-۱ تکامل سیستم‌های نورموج

فاز تحقیقاتی سیستم‌های ارتباط فیبرنوری حول و حوش ۱۹۷۵ آغاز شد. پیشرفت عظیمی که در دوره‌ای ۲۵ ساله تحقق یافت از ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۰ طول کشید و آن را می‌توان در چند دوره‌ی مشخص دسته‌بندی کرد. همانطور که از تجربه‌های آزمایشگاهی گوناگون برآمده است، شکل ۴-۱ افزایش در حاصلضرب BL در این دوره‌ی زمانی نشان می‌دهد [۱۲]. خط مستقیم مربوط به دو برابر شدن حاصلضرب BL در هر سال است. در هر دوره، ابتدا BL افزایش می‌یابد اما سپس با رشد فن‌آوری شروع به اشباع شدن می‌کند. هر دوره‌ی جدید موجب تغییری اساسی، که به بهبود بیشتر عملکرد سیستم کمک می‌کند، می‌شود.



شکل ۱-۴ افزایش حاصلضرب BL در دوره‌ی ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۰ بواسطه‌ی چندین نسل از سیستم‌های نورموجی. علامت متفاوت برای نسل‌های متوالی بکار گرفته شده‌اند.

اولین نسل سیستم‌های نورموجی نزدیک $0.8 \mu\text{m}$ کار می‌کرد و از لیزرهای نیمه‌رسانای GaAs بهره می‌بردند. بعد از چند تلاش کارگاهی در طول دوره‌ی ۷۹-۱۹۷۷، چنین سیستم‌هایی در ۱۹۸۰ بطور تجاری در دسترس قرار گرفتند [۱۳] که با نرخ بیت 45 Mb/s کار می‌کردند و فاصله‌ی تکرارکننده‌هایی بیشتر از 10 km را مقدور می‌ساختند. فاصله‌ی زیاد تکرارکننده در این حالت نسبت به فاصله‌ی 1 km سیستم‌های محوری انگیزه‌ی مهمی برای طراحان بود زیرا باعث کاهش هزینه‌های نصب و نگهداری به ازای هر تکرارکننده می‌شد.

در دهه‌ی ۱۹۷۰ به وضوح می‌دانستند که با کار سیستم نورموجی در ناحیه‌ی طول‌موجی نزدیک $1.3 \mu\text{m}$ ، که اتلاف فیبر کمتر از 1 dB/km است، فاصله‌ی تکرارکننده می‌تواند بطور قابل توجهی افزایش یابد. بعلاوه فیبرهای نوری پاشندگی کمینه‌ای را در این ناحیه‌ی طول‌موجی نشان می‌دهند. تحقق این امر موجب سوق تلاش‌های جهانی به سوی گسترش لیزرها و آشکارسازهای نیمه‌رسانای InGaAsP فعال در نزدیکی $1.3 \mu\text{m}$ شد. نسل دوم سیستم‌های ارتباط فیبرنوری در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ ممکن شد، اما بخاطر پاشندگی در فیبرهای چندم نرخ بیت این سیستم‌ها به زیر 100 Mb/s محدود بود [۱۴]. این

فصل ۱ مروری بر تاریخچه مخابرات

محدودیت با استفاده از فیبرهای تک‌مد رفع شد. یک تجربه‌ی آزمایشگاهی در ۱۹۸۱ انتقال 2 Gb/s را برای فیبر تک‌مدی به طول 44 km نشان داد [۱۵]. به زودی معرفی رسمی سیستم‌های تجاری آغاز شد. در ۱۹۸۷ سیستم‌های نورموجی نسل دوم، که در نرخ‌بیت بالای 1.7 Gb/s با فاصله‌ی تکرارکننده‌ی در حدود 50 km کار می‌کردند، بطور تجاری در دسترس بودند.

فاصله‌ی تکرارکننده‌ی سیستم‌های نورموجی نسل دوم با اتلاف‌های فیبر در طول‌موج $1.3 \mu\text{m}$ (بطور نوعی 0.5 dB/km) محدود می‌شد. اتلاف‌های فیبرهای سیلیکا در نزدیکی $1.55 \mu\text{m}$ کمینه می‌شود. در واقع اتلافی برابر 0.2 dB/km در سال ۱۹۷۹ در این ناحیه‌ی طیفی دیده شد [۱۶]. با این حال معرفی سیستم‌های نورموجی نسل سوم که در $1.55 \mu\text{m}$ کار می‌کردند بطور قابل توجه‌ای بخاطر پاشندگی بزرگ فیبر در نزدیکی $1.55 \mu\text{m}$ به تاخیر افتاد. لیزرهای نیمه‌رسانای InGaAsP مرسوم را بخاطر پهن‌شدگی پالسی بواسطه‌ی نوسان همزمان چندین مد طولی نمی‌شد بکار گرفت. مساله‌ی پاشندگی را می‌توان یا با استفاده از فیبرهای پاشندگی جابجاشده که برای داشتن پاشندگی کمینه در نزدیک $1.55 \mu\text{m}$ طراحی شده‌اند و یا با محدود ساختن طیف لیزر به یک مد طولی منفرد برطرف ساخت. هر دو رویکرد در طول دهه‌ی ۱۹۸۰ دنبال شد. در ۱۹۸۵، تجارب آزمایشگاهی امکان انتقال اطلاعات در نرخ‌بیت بالای 4 Gb/s را به ازای فواصل بیشتر از 100 km نشان دادند [۱۷]. سیستم‌های نورموجی نسل سوم که در 2.5 Gb/s کار می‌کردند به سال ۱۹۹۰ بطور تجاری در دسترس قرار گرفتند. چنین سیستم‌هایی قادر به کار با نرخ‌بیت بالای 10 Gb/s هستند [۱۸]. بهترین عملکرد با استفاده از فیبرهای پاشندگی جابجاشده با لیزرهای نوسان‌کننده در یک مد طولی منفرد قابل حصول شد.

یک اشکال سیستم‌های $1.55 \mu\text{m}$ نسل سوم این بود که سیگنال بطور دوره‌ای با استفاده از تکرارکننده‌هایی که نوعاً $70-60 \text{ km}$ از هم فاصله داشتند بازتولید می‌شد. فاصله‌ی تکرارکننده را می‌توان با استفاده از یک الگوی آشکارسازی هموداین یا هتروداین افزایش داد زیرا بکارگیری آن موجب بهبود حساسیت گیرنده می‌شود. چنین سیستم‌هایی به سیستم‌های نورموجی همدوس اشاره دارند. سیستم‌های همدوس در طول دهه‌ی ۱۹۸۰ تحت توسعه‌ی جهانی بودند و مزایای بالقوه‌شان در خیلی از آزمایش‌های سیستم نشان داده شد [۱۹]. با این حال معرفی تجاری چنین سیستم‌هایی تا ظهور تقویت‌کننده‌های فیبری در ۱۹۸۹ به تعویق افتاد.