الاتصالات عبر الألياف البصرية

حلقة بحث علمية إعداد الطالب: فجر عفاشة.

إشراف المدرس: عبد الرحمن الهاشم.

العام الدراسي

2015-2016

المركز

الوطني

للمتميزين

إشكالية حلقة البحث: الحاجة إلى واسطة اتصالات الحزمة العريضة (قاعدة بيانات ضخمة) بأقل تكلفة وأقل تعقيدات و بأسرع وقت.

المقدمة: تطلب التطور الصناعي في بدايات القرن التاسع عشر إلى الحاجة إلى واسطة اتصال أسرع من البريد الذي كان سائداً حينها فكان اختراع الهاتف السلكي ثم تبعه اختراع اللاسلكي ثم تلاه اختراع المقاسم اليدوية و الآلية التي تصل بين الطالب و المطلوب بشكل آني.

ومع تزايد التطور كمّاً ونوعاً في منتصف و آواخر القرن العشرين دعت الحاجة إلى نقل كم هائل من البيانات و الصور أولاً بين المراكز الصناعية و فروعها في شتّى أنحاء العالم ثم تلاه الحاجة إلى نقل بيانات مماثلة بين مراكز البحث العلمي حول العالم من جامعات وغيرها ولا ننسى حاجة الجيوش الحديثة إلى اتصالاتها الخاصة فكانت فكرة تحميل هذه المعلومات و البيانات ذات التردد المنخفض على ترددات أعلى وعبر أقنية سلكية و لاسلكية حددتها الهيئة الدولية للاتصالات لكل منطقة جغرافية منعاً من تداخل الترددات فكان استعمال الأسلاك النحاسية لنقل البيانات بشكل مفرط قد أدى إلى غلاء ثمن هذه المادة ومن قبل الحاجة إلى الزيادة في قطرها ووزنها نتيجة العدد الهائل للأسلاك اللازمة لنقل القنوات المنفردة فكان اختراع الكبل النحاسي المحوري الأرضي منه و البحري وفي آواخر القرن العشرين ومع دخول عصر الاتصالات الحديث وابتداع ما يسمى الشبكة العنكبوتية (الانترنت) وما تحويه من كم هائل من البيانات و الصور و الفيديوهات لم يعد بمقدور الكوابل النحاسية العادية و المحورية نقل البيانات بالشكل المطلوب من ناحية الكم و النوع لخواصها التي تتعلق بالمقاومة و التخامد السريع في الترددات العالية التي نحتاجها عند ازدياد كم المعلومات إضافة إلى إمكانية التنصت عليها بسهولة هذا من جهة كذلك من جهة الاتصالات اللاسلكية ومحدودية القدرة على إنتاج ترددات متناهية العلو بسعر اقتصادي دون تداخل أو تشويش في جميع الحالات الجوية فكان كل هذا حافزاً بل دافعاً وبقوّة لاختراع وسيلة اتصال تتخلص من كل السلبيات المذكورة آنفاً وتحافظ في نفس الوقت على كل الإيجابيات بل تزيدها وكل ذلك تجسّد في الاتصال عبر الألياف البصرية التي تستخدم الضوء في الاتصالات و الضوء كما نعلم تردداته عالية جداً تمكننا من نقل ما نشاء من البيانات بسرعة الضوء وبأقل استطاعة ممكنة دون تداخل أو تشويش وبشكل اقتصادي لا يتعدى ال10% من أسعار مثيلاتها من الكوابل النحاسية.

مجلة الاتصالات السورية – مجلة المهندس العربي.

الفصل الأول:

الباب الأول: الطيف الكهرمغناطيسي:

يلتقط الإنسان حوالي 85% بالمئة مما يتعلمه بواسطة حاسة البصر أي عن طريق المعلومات النقولة إليه بواسطة الضوء.

ومن الغريب أن نذكر أن الإنسان لم يعرف ماهية الضوء بشكل صحيح حتى نهاية القرن الثامن عشر عندما أثبت إسحاق نيوتن أن ما نسمّيه الضوء الأبيض (المرئي) إنما هو في الحقيقة عبارة عن مجموعة ألوان قوس قزح, ادّعى كريستيان هويغنز بعد عدة أعوام أن الضوء هو عبارة عن حركة موجية وقد تأكد ذلك حينما أجرى توماس يونغ عام 1803م تجارب التداخل على الأمواج الضوئية وهكذا تحقق بشكل نهائي أن الفرق بين ألوان الضوء المختلفة إنما هو عبارة عن اختلاف في أطوال أمواجه.

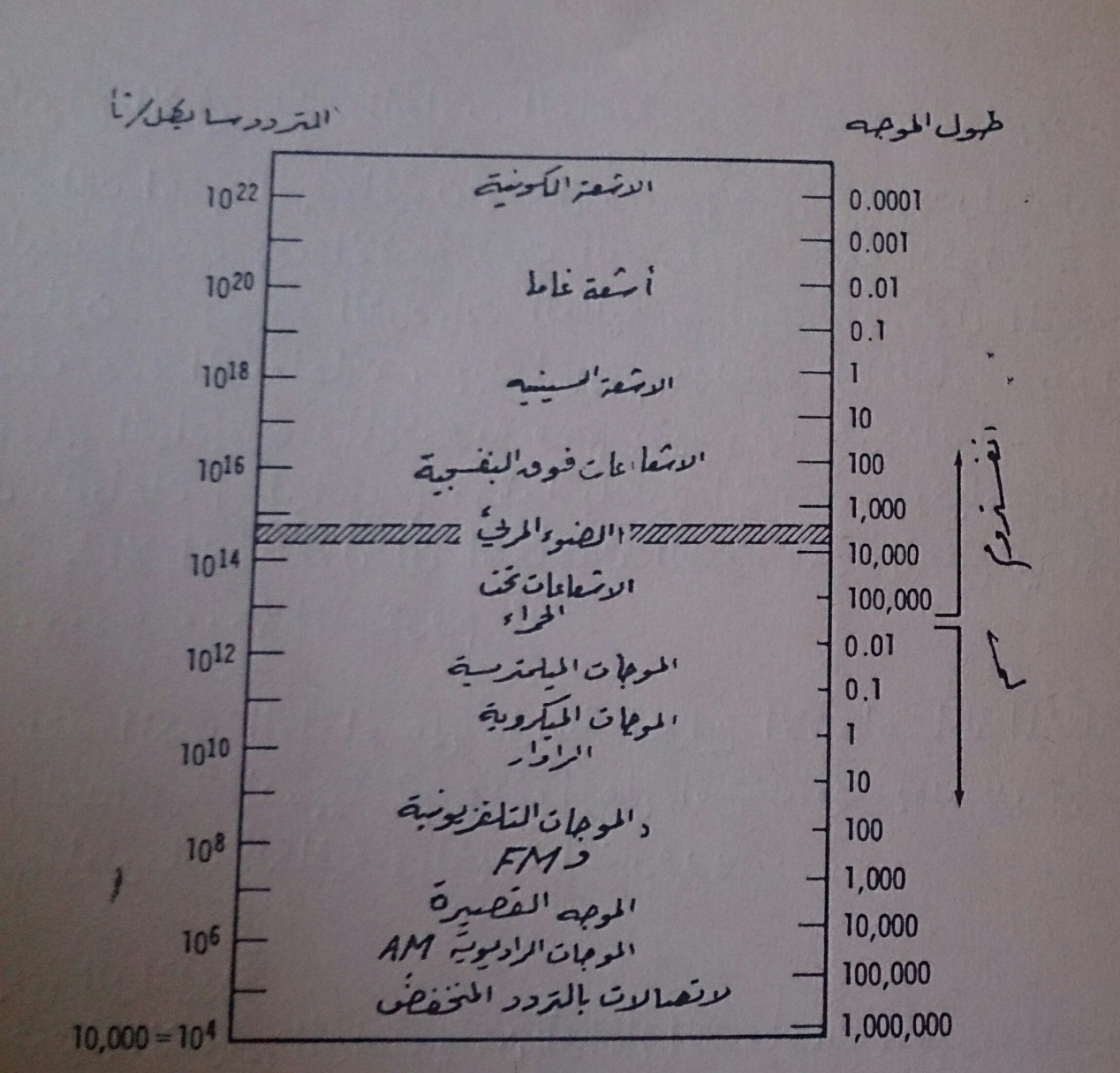
وحيث أن الضوء ظاهرة موجية لذا فهي لا تختلف من حيث المبدأ عن أمواج الماء التي نشاهدها دائماً فإذا وقفت على شاطئ البحر فبإمكانك أن تحصي بسهولة عدد الأمواج التي تقترب من الشاطئ خلال دقيقة واحدة.فإذا قسمنا عدد الأمواج على 60 نحصل بذلك على تواتر الحركة الموجية مقاساً بالهزة في الثانية (الهرتز).ولابد لك من عد الأمواج بسرعة هائلة إذا أردت أن تقوم بنفس العملية مع الأمواج الضوئية فهي تقوم ب400مليون هزة في الثانية وهذا هو معدل اهتزاز أمواج الضوء الأحمر بينما تهتز أمواج الضوء البنفسجي بضعفي هذه السرعة.

إذا نظرنا إلى أمواج البحر فإننا نلاحظ فيها انتظاماً قبل أن تقترب من الشاطئ نسمي البعد بين قمتين متتاليتين ب(طول الموجة) نقيس أمواج البحر بالقدم أو بالمتر بينما نقيس أمواج الضوء بجزء من عشرة ملايين من السنتيمتر وهذا أمر غير عملي لذلك يستخدم العلماء واحدة جديدة تسمى انغستروم وهي تعادل جزءاً من مئة مليون جزء من السنتيمتر أي 10 للأس -8 سم. تتراوح أطوال أمواج الضوء المرئي بين 4000 أنغستروم للضوء البنفسجي و7000 أنغستروم للضوء الأحمر.

قال وليام هرشل في نفس العام الذي تم فيه قياس طول موجة الضوء بتجربة مثيرة إذ عمد إلى تحليل الضوء إلى عناصره المختلفة بمساعدة موشور ثم وضع ترمومتراً(ميزان حرارة) في كل لون من ألوان الضوء على حدة وحينما نقل الترمومتر من الضوء البنفسجي باتجاه الضوء الأحمر استمرت درجة الحرارة في الارتفاع حتى بعد منطقة الضوء الأحمر حيث لا يشاهد أي ضوء صادر عن الموشور واكتشف هرشل الأشعة تحت الحمراء(وهي الأشعة التي تصلنا من الشمس) وترافق دوماً الضوء الأحمر المرئي كما اكتشف أنها استمرار لطيف الضوء المرئي بعد فترة قصيرة اكتُشفت الأشعة فوق البنفسجية في الطرف الآخر من طيف الضوء المرئي.

تتابعت بعدها بشكل مستمر دراسات أمواج الأشعة الضوئية من طرفي الضوء المرئي ونتج عنها ما يسمى ((الطيف الكهرمغناطيسي)) للأمواج وهو يحتوي أنواعاً مختلفة من الإشعاع.

ففي المجال الواقع فوق الضوء المرئي (أي عند الترددات الأعلى منه) نجد الأشعة فوق البنفسجية و الأشعة السينية وأشعة غاما و الأشعة الكونية بينما نجد في المجال الواقع تحت الضوء المرئي (أي عند الترددات الأدنى منه) الأشعة تحت الحمراء والأمواج الميكروية و الأمواج الراديوية كما نجد في الجدول الآتي أن الضوء المرئي يشغل حيزاً صغيراً جداً فقط من الطيف الكلي وتجدر الإشارة هنا إلى التناسب العكسي بين طول الموجة و التردد فإذا ازداد طول الموجة انخفض معه التردد و العكس صحيح.



صورة رقم -1-

إن الأمواج و الأشعة العديدة تختلف بشكل كبير في تأثيراتها المتبادلة مع المادة لكنها جميعها تعتبر أعضاء في أسرة واحدة إن الاختلاف الوحيد الكائن بينها مثل اختلاف ألوان قوس قزح مردّه إلى اختلاف أطوال أمواجها ولا تختلف طرق توليد هذه الأمواج إلا في بعض الحالات الخاصة.

لقد اهتم الفيزيائيون بشكل واضح حتى الآن بدراسة أمواج الطيف الممتدة بين الأشعة تحت الحمراء و الأشعة الكونية وهم يفضلون بسبب الترددات العالية استخدام طول الموجة في وصف هذه الإشعاعات بينما يهتم مهندسو الاتصالات بدراسة الأمواج الميكروية و الراديوية وهم يقيسونها بتردداتها ولذلك تجد مذياعك (الراديو) مرقماً بالترددات مقاسة بكيلو سايكل/ثانية, إلا أننا نقول ان إشعاعات الضوء المرئي تقع في المجال بين 4000 و 7000 أنغستروم.

لقد انكب العلماء على دراسة أنواع الإشعاعات المختلفة نظراً لحداثتها النسبية ثم عكفوا على استخدامها بعد أن تجمعت لديهم المعلومات الكافية و الخبرة الضرورية.

كما أن طريقة توليد الحقول المغناطيسية المتغيرة مع الزمن وطريقة انتشارها في الفراغ تهم كل فيزيائي كما أن دقة و اعتمادية الاتصالات ترتبط تماماً بكمية القدرة المنتشرة وطريقة معاملتها بكفاءة.

يمكن توليد الأمواج الكهرطيسية عن طريق ظواهر فيزيائية مختلفة وفي الواقع فإن طريقة توليد هذه الأمواج هي التي تفرّق بين الضوء و الأمواج الراديوية ومن أجل الأمواج الضوئية فإن القدرة تنجم عن التركيب الفيزيائي أو الكيميائي للمادة بحد ذاتها وكنتيجة لهذه فإن الترددات الناجمة مبعثرة ضمن طيف ضيّق وفي الحالة العامة نجدها غير مترابطة وهكذا فإن الضوء المرئي لا يتكون من تردد وحيد ذو سعة ثابتة بل يتكون من ترددات مختلفة بالسعة و المطال و التردد (من البنفسجي حتى الأحمر).

وفي التجربة التي أجراها العالم هرتز كانت الأمواج الراديوية غير مترابطة ولكن باستخدام دارات الدين كان من السهل الحصول على أمواج ذات تردد ثابت و سعة ثابتة.

وتقسم الأمواج الكهرطيسية إلى عدة أقسام :

1-الموجات الطويلة جداً: very long wave)) وينحصر طولها الموجي بين (10– 100)كم أي ترددها بين (30 - 3) كيلوهرتز فقط وهي تستخدم في الملاحة و الاتصالات البحرية إلا انه استغني عن الاتصال عبر الموجات الطويلة جداً لما يلحقها من تشويش وضجيج ناتج عن طول موجاتها وكثرة التداخلات الموجودة فيها.

2-الموجات الطويلة: (long wave) وينحصر طول موجاتها بين (1- 10)كم وترددها بين (300-30)كيلوهرتز وتستخدم في البث الإذاعي أحياناً والمجال (50-500)كيلوهرتز يستخدم للنقل الهاتفي السلكي.

3-الموجات المتوسطة: (medium waves) وأطوال موجاتها بين (100م-1كم) وينحصر ترددها بين(3ميغاهرتز-300كيلوهرتز) وهذه القيم كلها تقريبية بالنسبة لتخامد الموجات حسب طولها وتستعمل في البث الإذاعي.

4-الموجات القصيرة: (short waves) وطول موجتها بين(10-100متر) وترددها بين(3-30)ميغاهرتز وتستخدم في جميع أنواع الاتصالات المستخدمة لجميع الأغراض.

5-الموجات القصيرة جداً: (very short waves) وطول موجتها بين(1-10متر) وترددها بين (30-300ميغاهرتز) وتستخدم هذه الأمواج للإرسال التلفزيوني عبر الأقمار الصناعية وتستخدم كإرسال إذاعي عن طريق التعديل الترددي FM ومجاله بين (88-108)ميغاهرتز.

6-الموجات الفائقة القصر: (super short waves) وينحصر ترددها بين (3-30) جيجاهرتز وطول موجتها بين (1-10)سم وتستخدم في الأقمار الصناعية والاتصالات الفضائية.

7-الموجات المتناهية في القصر: (extremely short waves) وترددها بين(30-300)جيجاهرتز وطول موجتها بين (1مم-1سم) لها استخدامات مستقبلية متعددة في مجال الاتصالات وغيره.

أشعة ليزر و الأشعة النووية- الليزر.

الباب الثاني: الأمواج الميكروية:

لا بد من الإشارة إلى أهمية الأمواج الميكروية التي احتلت مركزاً هاماً في العالم في مجال الاتصالات مثل نقل البرامج التلفزيونية عبر القارات بواسطة الدارات الميكروية كما أن نفس هذه الدارات تقوم بنقل مئات من الأقنية الهاتفية و التلفزيونية وكذلك فإن الأمواج الميكروية تستخدم في الاتصالات ما بين المدن كوسائل اتصال بوصلات مكروية كما تستخدم بالإرسال بين استوديوهات محطات التلفزيون ومحطات الإرسال البعيدة.

وتعتبر الأمواج الميكروية عنصراً هاماً في الاتصالات الداخلية وعبر دول العالم كافة حيث تستخدم في أوروبا كوسيلة اتصال لاسلكية بين شركات الخطوط الحديدية ومحطاتها وبين الشركات المالية والنقدية وفي كل مجالات الحياة اليومية العامة و الخاصة وقد ساعدت تطور الاتصالات بواسطة استخدام الأمواج الميكروية كثيراً في عملية تطوير الملاحة البحرية والجوية و الفضائية و التحكم فيها ومراقبتها.

يتم نقل الأمواج الميكروية في الفراغ الحر بين هوائيين أو أكثر ويتكون نظام الاتصال المستخدم من مولد الأمواج الميكروية إلى الهوائي عادة من خطوط محورية واسطوانات معدنية مفرّغة ذات مقطع مستطيل أو دائري تسمّى بمرشدات الأمواج.

ومما يجب معرفته أن مفاقيد الخطوط المحورية أكبر من المفاقيد في مرشدات الأمواج ولهذا فإن لها استعمالاً محدداً من أجل المسافات القصيرة أو من أجل الحالات الخاصة التي تتطلب عرض مجال كبير للخط المحوري.

إن تصميم وبناء نظم النقل يعتبر عاملاً هاماً في مجال الاتصالات الميكروية وله دراسة وبحوث خاصة.

من أسباب استخدام الأمواج الميكروية هو اعتبارات عرض المجال:

هناك علاقة مباشرة بين عرض المجال وكمية المعلومات التي يمكن نقلها في نظام ميكروي فكلما زادت كمية المعلومات المراد نقلها كلما كان عرض المجال المطلوب في نظام النقل كبيراً.

ويمكن استخدام منبع للأمواج الكهرطيسية ذي تردد وحيد لنقل تلك المعلومات وذلك باستخدام إحدى طرق التعديل الممكنة.

وبغض النظر عن طريقة التعديل المستعملة فإن الغاية منها هي توليد حزم جانبية بالنسبة للموجة الحاملة كما أن الانحراف الترددي في هذه المجموعة الجانبية يرتبط مباشرة مع المعلومات المنقولة.

ولنأخذ على سبيل المثال عملية التعديل في السعة في الأجهزة الإذاعية التي تتم عند التردد 1 ميغاهرتز والتي تحمل برنامجاً إذاعياً عرض مجاله 10 كيلوهرتز.

فإن هذه المحطة تحتاج إلى عرض مجال 20 كيلوهرتز حول الموجة الحاملة ومن الجدير بالذكر أن المجال الترددي لعمل أجهزة التعديل السعوي الإذاعية يقع ضمن المجال (0.5 – 1.5) ميغاهرتز بالثانية ولهذا فإن عدد المحطات الإذاعية التي تعمل مع بعضها ضمن منطقة جغرافية واحدة سوف يكون محدوداً.

وكمثال آخر فإننا نأخذ حالة المحطات التلفزيونية التي تحتاج إلى عرض مجال قدره 5 ميغاهرتز لنقل إشارة الرؤيا التلفزيونية وواضح أنه لا يمكن استخدام التردد 1ميغاهرتز كموجة حاملة ومع ذلك فإن الموجة 100 ميغاهرتز يمكن أن تستخدم بسهولة والسبب الأساسي لأهمية الاتصال بالأمواج الميكروية هو إمكانية وضع عدد كبير من القنوات الترددية التي تشغل حيزاً كبيراً في مجال الطيف الترددي.

أشعة ليزر والأشعة النووية.

الفصل الثاني:

الباب الأول: طبيعة الإشعاع الضوئي وسرعته:

طبيعة الضوء: كان الاعتقاد السائد حتى منتصف القرن السابع عشر تقريباً هو أن الإشعاع الضوئي مكون من سيل من الجسيمات تصدر من منابع الضوء كالشمس أو لهيب الشمعة ثم تسير مبتعدة من منبعها في خطوط مستقيمة فإذا وردت أجساماً شفافة نفذت منها وإذا وردت أجساماً عاتمة انعكست على سطوحها ومتى دخلت الجسيمات العين هيّجت فيها حس الرؤية وفي منتصف القرن السابع عشر نمت فكرة جديدة تذهب إلى أن الضوء قد يكون نوعاً من أنواع الحركات الجيبية إلا أن أكثر العاملين في علم الضوء تمسّكوا بالنظرية الجسيمية وفي عام 1678م برهن كريستيان هويغنز على أنه يمكن تفسير قوانين الانعكاس و الإنكسار بالاستناد إلى النظرية الموجية وعلى أن هذه النظرية قادرة على أن تفسر تفسيراً قطعيّاً ظاهرة الانكسار المضاعف التي كانت قد اكتشفت قبل ذلك بقليل ولكن النظرية الموجية لم تلقَ قبولاً سريعاً فقد عارضها البعض قائلين أنه لو كان الضوء حركة موجية يحق لنا أن نرى ما وراء الحواجز لأن الأمواج قادرة على أن تدور حول الحواجز القائمة في طريقها كما هو الحال في الإشعاع الكهرطيسي للأمواج المتوسطة و القصيرة والطويلة.

ونحن نعلم اليوم أن أطوال موجات الضوء القصيرة جداً جداً بحيث يجعل انعطاف الأمواج عن مسارها المستقيم انعطافاً صغيراً جداً لا نستطيع أن نكتشف وجوده في الشروط العادية.

إلا أن الانعطاف هذا موجود فالضوء ينعطف حقًاً حول أطراف الأجسام التي يلقاها في طريقه وقد تم اكتشاف هذه الظاهرة المسمّاة بالانعراج.

وفي الربع الأول من القرن التاسع عشر قام العالمان توماس ينغ و اوغتن فرنل تجارب لدراسة التداخل ثم قام العالم ليون فوكو بقياس زمن سرعة الضوء في الموائع فبرهنت هذه القياسات وتلك التجارب برهاناً قاطعاً على وجود ظواهر ضوئية تبخر في تفسيرها النظرية الجسيمية للضوء و الإشعاع الكهرطيسي.

وهكذا برهن العلماء على أن انتشار الضوء في خط مستقيم حسب نظرية فرنل وبرهن غريمالدي على ظاهرة الانفراج كما تمكن ينغ من قياس سرعة الضوء وهكذا فقد توصل هؤلاء العلماء إلى البرهان على أن طبيعة الضوء و الإشعاعات الكهرطيسية هي طبيعة موجية إشعاعية لا طبيعة جسيمية.

الأمواج و الأشعة: عندما تصدر الأمواج من منبع صغير وتنتشر في وسط متجانس فإن صدور الأمواج تكوّن كرات مركزها المنبع وتزداد أنصاف أقطار هذه الكرات مع ازدياد البعد عن المنبع وحتى تكاد صدور الأمواج هذه تصبح مستويات.

إن صدر الموجة هو المحل الهندسي للنقاط التي يكون فيها للأمواج طور واحد وأن سرعة الطور هي سرعة انتشار هذه السطوح ذات الطور الواحد .

والجدير بالذكر أن طول الأمواج الكهرطيسية القادرة على استثارة العين هو بين (0.0004 – 0.00007)سم ويمكن أن نعبر عن هذه الأطوال بوحدة مناسبة حيث تستعمل ثلاث وحدات صغيرة وهي: الميكرو متر10 للأس-6 متر و النانو متر10 للأس-9 متر و الأنغستروم10 للأس-10 متر.

والجدير بالذكر أنه تبلغ سرعة الضوء في الفضاء ثلاثمئة ألف كيلو متر بالثانية أي 10x3 للأس 8 متر بالثانية وتتخذ هذه السرعة وحدة انتشار الأمواج الكهرطيسية الراديوية بالفضاء و يعطى طول موجة الإشعاع الكهرطيسي بالعلاقة الآتية:

طول الموجة = سرعة الضوء/ التردد الاهتزازي

سرعة الضوء: اتُخذت سرعة انتشار الأمواج الكهرطيسية الراديوية مساوية لسرعة انتشار الضوء وقد أثبتت كل التجارب التي أجريت صحة ذلك حيث أن طبيعة الضوء هي موجية اهتزازية وقد تمكّن العلماء من خلال دراستهم وتجاربهم من قياس تلك السرعة.

وتعتبر سرعة الضوء في الفضاء الخالي إحدى ثوابت الطبيعة الأساسية وهي سرعة عظيمة تساوي 3x 10للأس 8 متربالثانية.

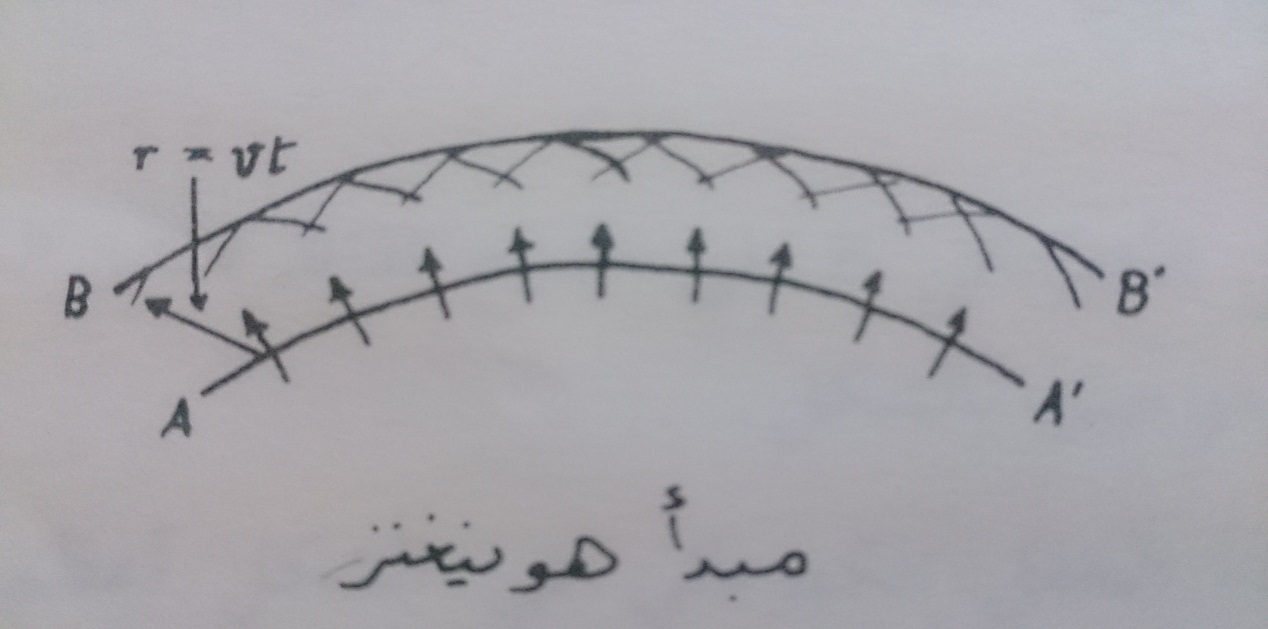
ولم يتمكن العلماء من قياسها حتى عام 1676م حيث كان معظم الاعتقاد قبل ذلك أن الضوء ينتشر بسرعة غير محدودة.

وبدأت أولى محاولات قياس سرعة الضوء من العالم الإيطالي غاليليه وتبعه بعد ذلك الفلكي الدانماركي رومر ثم العالم الفرنسي فيزو وأخيراً الفيزيائي الأمريكي ألبرت ميكسلون(1852- 1931)م حيث وصل إلى أدق النتائج وذلك باستخدام طريقة فوكو.

وقد أجرى تجاربه الأولى عام 1878م عندما كان يعمل في الأكاديمية البحرية في آنابوليس أما قياساته الأخيرة التي كان يجريها فلم يتمها بسبب وفاته إلا أنه قام بتكميلها بعده الفيزيائيان(بيز وبيرسون) في عام 1935م وتوصلوا لنتيجة وهي أن سرعة الضوء هي بالتحديد تماماً 2.997929x10للأس8 متر/ثانية وبذلك بخطأ قدره 0.000008 متر/ثانية إلا أنه أجرى بعد ذلك العالمان الأمريكيان(روزا و دورسي) أدق قياسات تجريبية وتوصلوا إلى أن سرعة الضوء هي: 2.9979 x10 للأس8 وبخطأ 0.001 متر/ثانية.

مبدأ هويغنز: إن مبدأ هويغنز طريقة هندسية لإيجاد صور الموجة في لحظة ما بالاستناد إلى شكلها في لحظة سابقة وينص المبدأ على أن كل نقطة من صدر الموجة يمكن أن تعتبر منبعاً لمويجات صغيرة ثانوية تنتشر في كل المناحي بسرعة تساوي سرعة انتشار الأمواج نفسها ويتم إيجاد صدر الموجة الجديد عندئذ بإنشاء السطح المناسب للمويجات الثانوية وهو سطح يسمى بمغلّف المويجات.

وإذا لم تكن سرعة الانتشار واحدة في كل أجزاء صدر الموجة (بسبب اختلاف وسط الانتشار مثلاً) فإنه وجب استخدام السرعة المناسبة لكل موجة من المويجات المختلفة.



صورة رقم-2-

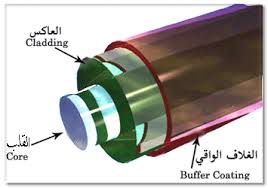
ونرغب في أن نجد شكل صدر الموجة بعد انقضاء مجال زمني t فلتكن v سرعة الانتشار ولنرسم عدداً من الدوائر (هي آثار المويجات الكروية) تساوي أنصاف أقطارها r = v.t وتقع مراكزها على AA' في الشكل السابق.

إن أثر مغلف هذه المويجات وهو صدر الموجة الجديد هو المنحني BB' وقد افترضنا أن السرعة v هي واحدة في كل النقاط وفي كل المناحي.

وهكذا نرى أن مبدأ هويغنز صحيحاً في كل أنواع الأمواج: كالأمواج الضوئية والأمواج الراديوية و الأمواج الصوتية.

كما تصح في هذه الأمواج أيضاً كل الظواهر الموجية الأخرى كالانعكاس و الانكسار و التداخل والانعراج.

أشعة ليزر والأشعة النووية.

الباب الثاني: الألياف البصرية: 

صورة رقم-3-

بعد دراسة الطيف الكهرطيسي لمجال الترددات الواسع وكيفية استخدام الأطوال الموجية المختلفة في الاتصال لا بد من التركيز على الأداة المثالية والأكثر استخداماً حاليّاً حول العالم:

اكتشاف الزجاج: تشير بعض المراجع إلى أن بحار فينيقي سوري أول من اكتشف الزجاج ويرى بعض العلماء أن الفراعنة هم أول من صنع الزجاج منذ ثلاثة آلاف سنة لكنهم لم يتمكنوا من صنع نوع شفاف بسبب استخدامهم مواد أولية مشوبة ببقايا الأكاسيد ومع تقدم علم الكيمياء وتطور صناعة الزجاج تمكن علماء آخرون من صنع الزجاج الشفاف وفي ستينات القرن الماضي ارتفعت الشفافية عشرة آلاف مرة بفضل تقنية إنتاج ثاني أكسيد السليكون عالي النقاء والتي مكنت العلماء من تمرير جميع الأشعة الضوئية من فوق البنفسجية إلى تحت الحمراء من خلال الألياف الزجاجية اعتماداً على قدرة الزجاج بعكس وكسر الضوء وتشير المراجع إلى أنه في عام 1927م طالب العالم بيرد البريطاني وهانسل الأمريكي باستخدام الألياف الزجاجية لنقل الصور التلفزيونية ومع اكتشاف أشعة الليزر عام 1960م بدأ التفكير الجدي باستخدام الألياف ومنذ ذلك الوقت تأخذ الأبحاث شكلاً جديداً نظراً للإمكانات الهائلة التي تقدمها أشعة الليزر كان ذلك مع العالم دونالد كيك في عام 1970م عندما بدأ بضبط مسار انطلاق الشعاع خلال قلب الليف الزجاجي وفي عام 1979م تمكن العلماء من إنتاج ألياف زجاجية بلغت من الشفافية والنقاء حدها الأقصى فأصبحت العصب الأساسي لشبكات الاتصال في العالم و القوة المحفّزة لتنامي شبكة الانترنت وقد تم البرهان على حقيقة الإرسال عبر الليف الضوئي عمليّاً في القرن التاسع عشر ومع منتصف القرن العشرين بدأت هذه التكنولوجيا تتطور بسرعة وخاصة بعد إيجاد المصدر الضوئي المناسب الذي كان منها الديودد الضوئي ((الذي نستخدمه حالياً في منازلنا)) "Light emitting diode) "LED)

والديود الليزري الذين يحققان المتطلبات بعد أن بينت التجارب و الأبحاث أن قدرة الضوء على حمل المعلومات تفوق قدرة أعلى الترددات الراديوية بعشرة آلاف مرة على الأٌقل كما أن هناك مزايا إضافية لليف الضوئي مقارنة بالكبل النحاسي ومنها القدرة على حمل المعلومات لمسافات طويلة وبمعدل خطأ منخفض والمناعة العالية ضد التداخل الكهربائي و السرية غير القابلة للاختراق إضافة إلى خفة وزنه وغير ذلك الكثير ومع إدراك هذه الخصائص اقترحت الأبحاث في منتصف الستينات من القرن الماضي أن يكون الليف الزجاجي هو الوسيط المناسب للإرسال رغم وجود عائق أساسي وهو التخامد الكبير في شدة الإشارة آنذاك والذي كان في عام 1970م أقل من 20دسيبل/كيلومتر ومع كذلك كان من الممكن استخدامه في تكنولوجيا الاتصالات فقد تم تركيب أول ليف ضوئي في العالم يعتمد نظام الإرسال الضوئي في شيكاغو عم 1976م بسرعة 45ميغابايت بالثانية وفي عام 1988م تم ربط شمال أمريكا مع فرنسا عبر المحيط الأطلسي بكل ضوئي وكانت السرعة 565ميغابايت بالثانية وقبل عام 1955م كان نظام الإرسال الضوئي يتم على قناة ضوئية واحدة (طول موجي واحد) وباستخدام التقنية TDM وصلت السرعة حتى 10جيجابايت بالثانية أما بعد ذلك العام وبعد ظهور تقنية WDM التي تسمح بإرسال عدة أقنية ضوئية عالية السرعة بآن واحد وعلى عدة أطوال موجية تصل اليوم إلى 160 طول موجي فقد وصلت السرعة إلى 40جيجابايت بالثانية عبر طول موجة واحدة لتصبح السعة الكلية 6.4 تيرابايت بالثانية.

النوافذ الضوئية ومراحل التقنية:

لم يكن من الممكن الوصول إلى السرعات الكبيرة لولا القفزة التكنولوجية المتمثلة باقتحام العلماء لذلك الجزء الفريد من حيز الطيف الكهرومغناطيسي والمعروف بالحيز الكهروبصري ونظراً لخواصه الفريدة وقصر أطواله الموجية فقد أمكن استغلاله بالاتصالات بنقل الإشارات الصوتية والمرئية وكل أنواع المعطيات عبر شعيرات زجاجية دقيقة لا يزيد سمكها على سمك شعرة الإنسان. فقد توجهت أغلب التطورات الحاصلة في هذا المجال نحو استخدام مناطق محددة من الطيف حيث يكون التخامد الضوئي فيها منخفضاً.

ويمكن تقسيم مراحل التطور إلى خمسة أجيال تقنية:

الجيل الأول:صمم ليقوم بنقل المعلومات بمعدل يتراوح بين2-140 ميغابايت بالثانية استخدمت فيه منابع ضوئية مصنعة من زرنيخ الجرمانيوم وكواشف سلكونية تعمل في أطوال موجية تتراوح بين 810 و900 نانومتر.

الجيل الثاني: تم تطوير منابع وكواشف ضوئية تعمل عند الطول الموجي 1300نانومتر حيث ينخفض الفقد في الليف الضوئي إلى 1ديسبل/كيلومتر

الجيل الثالث:أدى استخدام الألياف البصرية أحادية النمط إلى القضاء على التشتيت واستخدام طول موجي 1310نانومتر للحصول على فقد يقل عن 1ديسبل/كيلومتر.

الجيل الرابع:تم تشغيل هذه النظمة عند الطول الموجي 1550نانومتر حيث الفقد أقل أدى تطوير العناصر المستخدمة في هذه الأنظمة كالمنابع و الكواشف لبناء أنظمة تعمل بمعدل نقل معلومات قدره 10جيجابايت بالثانية.

الجيل الخامس: استمرت الأبحاث في تطوير عناصر نظم اتصالات الألياف البصرية للحصول على أفضل الظروف التشغيلية مما مهد إلى بروز الجيل الخامس والذي توفرت له عناصر عديدة فكانت البداية في تحسن حساسية أجهزة الاستقبال واستخدم الكشف الهيترودين بدلاً من الكشف المباشر والذي مكن من وجود وسائل ذات كفاءة لاختيار القنوات في الأنظمة التي تستخدم تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي WDM حيث تمكن الباحثون من تطعيم الألياف الزجاجية بمادة الأربيوم أدى ذلك التطعيم للحصول على مضخمات ذات كسب عالي أطلق عليها مضخمات الليف المطعم بالأربيوم EDFA,s والتي وجدت استخداماً واسعاً في خطوط النقل ولم يقتصر استخدام الألياف المطعمة بمادة الأربيوم على المضخات فحسب بل تعداها لتشمل استخدام الليزر وكثير من الدارات الغير خطية كما أن هذه المضخمات قد مهدت الطريق لأنظمة اتصالات سريعة وبروز أنظمة نقل تعتمد الطول الموجي 1550نانومتر. أدت هذه التطورات السريعة إلى شيوع استخدام أنظمة الاتصالات الليفية البصرية في كافة مجالات الاتصالات بدءاً من شبكات النفاذ عند المستخدم إلى الاتصالات بعيدة المدى سواء في اليابسة أو عبر البحار.

فما هي الألياف الزجاجية:

هي عبارة عن شعيرات طويلة من زجاج بدرجة عالية من النقاء يصل قطرها إلى حد يماثل قطر شعرة رأس الإنسان تسمى الليف الضوئي تصطف المئات أو ربما الآلاف من هذه الألياف مع بعضها لتشكل حزمة يتم تغليفها بغطاء زجاجي لينتج لدينا ما يسمى بالكبل الضوئي ومكوناته هي :

القلب: وهو عبارة عن زجاج رفيع ينتقل فيه الضوء.

العاكس: مادة تحيط باللب الزجاجي وتعمل على عكس الضوء مرة أخرى إلى مركز الليف البصري.

الغطاء الواقي: غلاف بلاستيكي يحمي الليف البصري من الرطوبة ويحميه من الضرر و الكسر.

كيف ينتقل الضوء في الألياف الضوئية:

تنتقل الإشارات الضوئية في قلب الليف الزجاجي الرفيع (القلب) وذلك عن طريق الانعكاسات المتتالية للضوء والتي يحدثها العاكس المحيط بالقلب الزجاجي والذي يعمل كمرآة عاكسة للضوء.

ولأن العاكس لا يمتص الضوء الساقط عليه بل يقوم بعكسه إلى داخل الليف الضوئي طوال رحلته فإن الضوء ينتقل لمسافات بعيدة دون أن يُفقد أو يتضاءل من خلال ما يسمى بظاهرة الانعكاس الداخلي الكلي والتي تعتبر الأساس الفيزيائي لنقل الضوء خلال الليف ومع هذه الظاهرة فإن نسبة 100% من الأمواج الضوئية تنعكس عن القشرة الزجاجية دون أن يحصل أي امتصاص لها لتبقى ضمن القلب الزجاجي ولمعرفة أهمية هذه الظاهرة لا بد من الإشارة إلى أن المرآة تعكس حوالي 90% فقط من الأمواج الضوئية ولكن نتيجة لبعض الشوائب في زجاج الليف تضعف الإشارة الضوئية أثناء رحلتها عبر المسافات الطويلة تحدث ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي في الليف الضوئي ولكن في بعض الأحيان يحدث أن تضعف الإشارات الضوئية نتيجة لوجود الشوائب في مادة الزجاج الليفي وبشكل عام يمكن القول تعتمد كفاءة الليف الضوئي على عاملين:

1-درجة نقاء مادة الزجاج المصنوع منها الليف البصري (القلب).

2-الطول الموجي للضوء المستخدم في الإرسال فمثلاً في الأطوال الموجية 850 نانومتر تكون نسبة الضعف في الإشارات الضوئية المرسلة من 60% إلى 75% لكل كيلومتر وفي الأطوال الموجية 1300 نانومتر تتراوح النسبة من 50% إلى 60% لكل كيلومتر.

وتنقسم الألياف الضوئية حسب نمط انتشار الضوء فيها فإذا كان قطر قلب الليف كبير يدخل بمختلف الزوايا وبالتالي يثير مختلف الأنماط بينما إذا كان القطر ضيّقاً فيثير نمط واحد.

1-الليف ذو النمط المفرد ومعامل الانكسار الخطوي الثابت: يصل نصف قطر القلب الزجاجي فيها إلى 9 ميكرومتر تمر من خلاله أشعة الليزر تحت الحمراء ذات الطول الموجي 1300-1550 نانومتر حيث تمر الأشعة المنتشرة في المسار نفسه وتستغرق نفس الزمن للوصول إلى طرف الاستقبال وبسبب صغر قطره هناك حاجة لاستخدام مصدر ضوئي عالي التوجيه كالليزر لإدخال الضوء في الليف ويتميز هذا النوع بالسرعة العالية لنقل المعلومات لذلك يستخدم في شبكات الاتصال للمسافات الطويلة.

2-الليف ذو النمط المتعدد ومعامل الانكسار الخطوي الثابت: يصل نصف قطر القلب الزجاجي فيها إلى 63 ميكرومتر تمر من خلاله أشعة الليزر تحت الحمراء بمسارات متعددة ضمن القلب الزجاجي مما يؤدي إلى حدوث اختلاف في زمن وصول الأشعة إلى طرف الاستقبال وبالتالي فإن سرعة إرسال المعلومات أقل من النمط الأول مما يجعل استخدامها أفضل لشبكات الحاسوب.

3-الليف ذو النمط المتعدد ومعامل الانكسار المتدرج: وهنا تكون مادة الليف ذات كثافة متغيرة وبالتالي فإن معامل الانكسار متدرج تتناقص قيمته بالابتعاد عن مركز القلب الزجاجي وهذا يخفف من التشتت عما هو عليه في الليف متعدد النمط ذو معامل الانكسار الخطوي الثابت ونتيجة لذلك يحصل انحناء في مسار الضوء من جهة وإلى تعدد مسارات الضوء من جهة أخرى ويعتبر هذا النوع من الألياف وسطاً بين النوعين السابقين.

ظاهرة الانعكاس الداخلي: تحدث هذه الظاهرة بتوفر الشرطين التاليين:

1-عندما تعبر الحزمة الضوئية من وسط ذو كثافة ضوئية أعلى (معامل انكساره أكبر) إلى وسط ذو كثافة ضوئية أقل (معامل انكساره أقل)

2-أن تكون زاوية الورود أكبر من الزاوية الحرجة.

فتحة النفوذ العددية:

يتطلب اقتران الضوء في قلب الليف الضوئي وقوع شعاع الضوء الصادر عن المرسل ضمن زاوية معينة تدعى زاوية القبول ويتم التعبير عن فتحة النفوذ العددية بالعلاقة التالية: NA= (n^2-n'^2)^1/2 حيث n تمثل معامل انكسار القلب الزجاجي أما n' فتمقل معامل انكسار القشرة الزجاجية.

قد تتدهور الإشارة في الليف الضوئي وينتج ذلك عن عوامل عديدة أهمها:

1-التخامد: ويعتبر أحد العناصر الأساسية في تقويم أنظمة الاتصالات حيث تتعرض نبضات الإشارة الضوئية عند انتشارها في قناة الاتصال لعمليات مثل الامتصاص نتيجة وجود شوائب في الزجاج مثل جزيئات الهيدروكسيد أو نتيجة لأي خلل ذري فيه ويحدث التبعثر بسبب التغيرات الصغيرة في كثافة الليف الزجاجي واختلاف الأوان المرتبطة بالأطوال الموجية المكونة للضوء ويلعب التخامد دوراً أساسياً في اختيار الليف ومجال استخدامه حيث يجب أن تكون قنوات الاتصال بأقل تخامد ممكن حتى تنتشر الموجات الحاملة لأطول مسافة ممكنة في الليف كما أن فقد الضوء في الليف يعتمد إلى حد كبير على الطول الموجي المستخدم حيث ينخفض عند بعض الأطوال الموجية عند أطوال موجية أخرى وتقاس وحدة الفقد بالديسيبل لتعبر عن النسبة بين الطاقة الضوئية المستقبلة والطاقة الضوئية المرسلة في الليف.

2-التشتت: هو فصل الضوء إلى طيف الألوان من خلال الانكسار ويكون عامل الانكسار تابع لطول الموجة بالنسبة للأطوال الموجية الأطول يكون لها عامل انكسار أصغر قليلاً لذا فإن الضوء الحمر أقل انكساراً من الضوء البنفسجي لهذا السبب فإن الضوء الأبيض يتجزأ إلى طيف من الألوان. ينتقل الضوء الأحمر في الزجاج أسرع حيث له عامل انكسار أصغر وبالتالي انحناؤه أقل أما الضوء البنفسجي فهو أبطأ وله عامل انكسار أكبر وبالتالي أكثر انحناء بكلمات أخرى الترددات الأعلى تنحني أكثر و المثال الأكثر شيوعاً في الطبيعة هو قوس قزح وفي الألياف الضوئية فإن التشتت هو عبارة عن انبساط أو اتساع للنبضة عند مرورها في قناة الاتصال.

وفي نظم الاتصال بالألياف البصرية ينقسم التشتيت إلى نوعين هما التشتيت النمطي والذي يتم نتيجة سلوك الإشارات المرسلة مسارات مختلفة عند انتشارها داخل الليف مما يؤدي إلى عدم وصولها في وقت واحد أم النوع الآخر فهو التشتيت الداخلي وينقسم هذا التشتيت إلى نوعين تشتيت المادة وتشتيت الدليل الموجي يحصل هذا النوع من التشتيت في جميع انواع الألياف البصرية وينتج لكون المنابع الضوئية لا تبث الضوء بطول موجي واحد بل بحزمة من الأطوال الموجية وحيث أن معامل انكسار الزجاج المستخدم في الألياف يتغير مع الطول الموجي فإن ذلك سيؤدي إلى اختلاف في سرعة الإشارات أو النبضات مما يؤدي إلى انبساطها ويؤثر ذلك على كمية المعلومات المراد نقلها.

ومن أنواع التشتت أيضاً التشتت اللوني ويعني أن سرعة الضوء المنتقلة بالليف الضوئي تعتمد على الأطوال الموجية وعلى تصميم الليف لذا فإن بعض الأطوال الموجية تتأخر عن بعضها وذلك حسب طول موجة اللون فمثلاً موجة اللون الأزرق تصل إلى طرف الاستقبال قبل موجة اللون الأحمر.

قصور تقنية TDM وحاجة الشبكات الإقليمية والدولية لزيادة السعة:

تزايد الطلب على عرض الحزمة في السنوات القليلة الماضية ومن المحتمل أن يستمر ذلك في المستقبل من أجل تلبية متطلبات الزبائن والمحرك الأساسي لهذا الطلب المتنامي هي التطبيقات الفيديوية والهاتف الذي يعتمد بروتوكول الانترنت و تطبيقات الوسائط المتعددة و الموظفون الذين يعملون من منازلهم بدلاً من المكاتب وكل الخدمات التي تعتمد بروتوكول الانترنت حيث تشير إحصائيات مزودي الخدمة إلى أن عرض الحزمة يتضاعف في الشبكات الفقارية خلال فترة تتراوح من 6 إلى 9 أشهر استجابة للنمو في الحركة الناجمة عن استخدام خدمات شبكة الانترنت والتي تصل إلى نسبة 300% سنوياً بينما تسجل الحركة الناجمة عن خدمة الصوت التقليدية نسبة نمو سنوية تقدر ب13% فقط مما دفع شركات الاتصال بالبحث عن حلول لزيادة سعة (سرعة) قناة الاتصال بأقل كلفة ممكنة فكان لابد من تطوير تكنولوجيا الإرسال عبر الليف الضوئي لمواجهة انفجار الطلب على عرض الحزمة وحجم الحركة المتبادلة في الشبكة.

عرض النطاق:

يعرف عرض النطاق على أنه كمية المعلومات التي يمكن نقلها خلال ثانية واحدة وتقاس بواحدة بت بالثانية وكلما ازداد عرض النطاق ازدادت سعة النقل لليف الضوئي ولكي ندرك أهمية عرض النطاق نبين المثال التالي: لنقل مكتبة الكونغرس الأمريكي عبر مودم هاتف سرعته 56 كيلوبايت بالثانية نحتاج إلى زمن مقداره 81.5 سنة ولنقلها عبر خط بسرعة 1.5 ميغابايت بالثانية نحتاج إلى ثلاثة سنوات أما عبر قناة ضوئية بسرعة 1.7 جيجابايت بالثانية فنحتاج إلى 22.5 ساعة ولأهمية ذلك سارعت شركات الاتصال بالبحث عن حلول لزيادة سعة (سرعة) قناة الاتصال بأقل كلفة ممكنة وشرط أن تكون متوافقة مع البنية القائمة.

مجلة الاتصالات في القطر العربي السوري.

الحلول وخيارات زيادة السعة:

1-وضع ألياف جديدة: المقاربة الأكثر وضوحاً لزيادة عرض الحزمة للاتصال هو إضافة قنوات اتصال من خلال وضع أو مد مزيد من الألياف الضوئية الجديدة وهذا يمكن أن يكون الحل الأرخص إذا كان من السهولة إضافة ألياف جديدة إلى جانب الألياف القائمة أما من ناحية الكلفة أكثر كلفة.

2-زيادة معدل البت باستخدام TDM: ويمكن تحقيق ذلك إما من خلال زيادة فعالية عرض الحزمة للألياف القائمة عن طريق زيادة معدل البت حيث تدرجت معدلات الإرسال باستخدام تقنية TDM من 2.5 إلى 10 جيجابايت بالثانية وباستخدام إلكترونيات ذات تقنية معقدة أمكن الوصول إلى سرعة إرسال بلغت في الآونة الأخيرة 40 جيجابايت بالثانية ولكن يتطلب ذلك كلفة عالية إضافة إلى ذلك هناك عدة أمور يجب أخذها بعين الاعتبار:

أ-على سبيل المثال عند الإرسال بمعدل 10جيجابايت بالثانية عبر ليف ضوئي من نوع وحيد النمط فإن تأثير التشتت اللوني يكون أكبر بستة عشر مرة عما هو عليه عند الإرسال بمعدل 2.5جيجابايت بالثانية مما يعني أنه عند رفع معدل الإرسال بتقنية TDM يزداد التشتت اللوني.

ب-استطاعة الإرسال المطلوبة عند المعدلات العالية للسرعة ينتج عنها تأثيرات لاخطية تؤثر على جودة شكل موجة الإشارة المرسلة.

ج-التشتت القطبي يجعل النبضات الضوئية عبر انتقالها في الليف أكثر عرضاً و اتساعاً ومن العوامل المساهمة فيه معدل البت – تناظر قلب الليف الضوئي – عيوب الليف (ثني-ضغط الخ....).

3- استخدام عدة أطوال موجية: التتابع المنطقي هو باستخدام عدة أطوال موجية إذا كانت N عدد الأطوال الموجية فإن سعة القناة يزداد بالعامل N بدون تغيير سرعة التعديل توجد اليوم أنظمة عاملة عند N=160 channels ولايبدو أن هذا الحد النهائي فبزيادة عدد الأطوال الموجية المستخدمة في الليف الضوئي من خلال استخدام تقنية WDM يمكن تنضيد عدة أطوال موجية أو عدة ألوان ضوئية بنفس الزمن وصلت إلى 128 أو 160 طول موجة أو لون وكل منها يمكن أن يكون بمعدل يتراوح من 2.5جيجابايت بالثانية إلى 40جيجابايت بالثانية وبالتالي ازدادت السعة في الألياف القائمة المطمورة من دون مد ألياف جديدة.

أهم قيود استخدام TDM: هو انه وقبل ابتكار التنضيد كانت شبكات الهاتف تخصص خط فيزيائي لكل مكالمة هاتفية وكان هذا الحل باهظ الثمن وباستخدام تقنية التنضيد التي تعتمد على مبدأ أنه من الممكن وضع أكثر من مكالمة على خط واحد وبالتالي زيادة سعة وصلة الإرسال من خلال تجزيء الزمن إلى فواصل زمنية أصغر لذا فإن البتات القادمة من مصادر دخل متعددة يمكن أن تنقل عبر الوصلة مما يؤدي إلى زيادة عدد البتات المرسلة بالثانية.

ومع حاجة الشبكات إلى سرعات أكبر بدأت عيوب هذه التقنية بالظهور فإضافة إلى ما تم ذكره فإن كل حيز زمني يتم حجزه حتى عندما لا يكون هناك معطيات نريد إرسالها.

ومن أهم قيود الاستخدام في السرعات العالية:

أ-استخدام إلكترونيات معقدة وغالية الثمن.

ب-استخدام تقنيات تعديل معقدة .

ج-نقصان نسبة الإشارة إلى الضجيج.

د-ارتفاع التشتت.

4-التنضيد بالتقسيم الموجي المكثف: التنضيد هو عمليات يتم فيها تجميع عدد من إشارات الرسائل التماثلية أو سلاسل المعطيات الرقمية و إرسالها على شكل إشارة واحدة عبر وسيط اتصال.

تطور تقنية التنضيد DWDM وازياد عدد الأطوال الموجية: يمكن رؤية التقدم التكنولوجي في عملية الإرسال الضوئي كزيادة في عدد الأطوال الموجية مترافقة بنقصان المسافة بين الأطوال الموجية مما أدى إلى ازدياد السعة المنقولة عبر الليف الضوئي فمن خلال استخدام عملية التنضيد DWDM التي يتم فيها تنضيد عدة أطوال موجية وصل عددها حتى أواسط عام 2000م إلى 128 طول موجي كل منها تحمل معلومات منضدة بأسلوب TDM كما تم تضخيم الأطوال الموجية بدون تحويلها إلى إشارات كهربائية باستخدام المضخمات الليفية المطعمة بالإربيوم.

الفهرس

المقدمة الصفحة الثانية

الفصل الأول

الباب الأول الصفحة الثالثة

الباب الثاني الصفحة السابعة

الفصل الثاني

الباب الأول الصفحة التاسعة

الباب الثاني الصفحة الاثنا عشر

حلول الإشكالية الصفحة الثامنة عشر

الفهارس و المراجع الصفحة الحادية والعشرين

فهرس الصور

الصورة الأولى: جدول بأطوال الأمواج وترددات الطيف الكهرمغناطيسي الكلي. الصفحة الخامسة.

الصورة الثانية: مبدأ هويغنز.الصفحة الحادية عشر.

الصورة الثالثة: الليف البصري.الصفحة الثانية عشر.

المراجع: كتاب الليزر: كتبه هال هلمان,منشورات مؤسسة الطاقة الذرية الأمريكية,ترجمة وإعداد الدكتور مظفر شعبان و المهندس سمير شعبان, مطبعة الشرق حلب عام 1978م.

كتاب أشعة ليزر والأشعة النووية: كتبه المهندس فاروق السكر,سلسلة العلوم الحديثة العدد الثاني,دار الحكمة للطباعة والنشر,عام 1983م.

MC GRAW-HILL KOGAKUSHA-LTV

مجلة الاتصالات في القطر العربي السوري:الفقرة المأخوذة إعداد (المهندس رفيق محمود أحمد,الإدارة الفنية-مديرية شبكة المواصلات) العدد الحادي عشر أيّار 2011