

الفيزياء وتطور تكنولوجيا الاتصالات و تأثيراتها البيئية

إعداد

د/ مصطفى درويش- جامعه طنطا - كلية العلوم - قسم الفيزياء



1-المقدمة

2- الأسس الفيزيائية للاتصالات

2.2- خصائص الموجات والتضمين

3.2- انتشار الموجات في الأوساط المختلفة

3- من التلغراف إلى الراديو

1.3- التلغراف: أول نظام اتصالات كهربائي

2.3- الهاتف: نقل الصوت كهربائياً

3.3- الراديو: ثورة الاتصالات اللاسلكية

4- عصر الإلكترونيات

1.4- الصمامات المفرغة: البداية الحقيقية

2.4- الترانزستور: نقطة تحول في التاريخ

3.4- الدوائر المتكاملة والمعالجات الدقيقة

5- الألياف البصرية

1.5- الفيزياء وراء الألياف البصرية

2.5- أنواع الألياف البصرية

- 3.5- المزايا الفيزيائية للألياف البصرية
- 4.5- تقنيات التضمين الضوئي
- 5.5- المكبرات الضوئية
- 6- الاتصالات اللاسلكية الحديثة**
- 1.6- الهواتف المحمولة: من G 1 إلى G95
- 2.6- الفيزياء وراء MIMO
- 3.6- الموجات المليمترية والتحديات الفيزيائية
- 4.6- تشكيل الحزمة (Beamforming)
- 7- الأقمار الصناعية والاتصالات الفضائية**
- 1.7- الفيزياء المدارية والأقمار الصناعية
- 2.7- التحديات الفيزيائية للاتصال الفضائي
- 3.7- التقنيات المستخدمة
- 8- الإنترنت والشبكات**
- 1.8- البنية التحتية المادية للإنترنت
- 2.8- فيزياء الشبكات اللاسلكية (WiFi)
- 3.8- التأثيرات الفيزيائية على أداء WiFi
- 9- الأمن والتشفير الكومومي**
- 1.9- التشفير الكلاسيكي والفيزياء
- 2.9- توزيع المفاتيح الكومومية (QKD)
- 3.9- التحديات الفيزيائية لـ QKD
- 10- النكاه الاصطناعي ومعالجة الإشارات**
- 1.10- الشبكات العصبية في الاتصالات
- 2.10- الفيزياء وراء الشبكات العصبية
- 3.10- استهلاك الطاقة والحدود الفيزيائية
- 11- مستقبل الاتصالات**
- 1.11- الاتصالات الكومومية

2.11- الاتصالات بالتيرا هرتز

3.11- الهولوجرافيا والتواجد عن بعد

4.11- الحوسبة الحافية والضباب

12- التأثيرات الصحية للإشعاع الكهرومغناطيسي

1.12- طبيعة الإشعاع من أجهزة الاتصالات

2.12- الآليات الفيزيائية للتفاعل مع الأنسجة

3.12- الدراسات العلمية والأدلة الحالية

4.12- التأثيرات الخاصة بالأطفال

5.12- شبكات الجيل الخامس (G5) والمخاوف الخاصة

6.12- التوصيات الوقائية (مبدأ الحيطة)

7.12- قياس مستويات الإشعاع

8.12- التأثيرات النفسية والاجتماعية

9.12- الخلاصة العلمية المتوازنة

13- الخلاصة

14- المراجع (References)

1- المقدمة:

شهد العالم على مدار القرن الماضي ثورة غير مسبوقة في مجال الاتصالات، تحول فيها العالم من قرية كبيرة إلى شاشة صغيرة في جيب كل إنسان. وخلف هذا التطور المذهل تقف الفيزياء كعلم أساسي، حيث أن كل ابتكار في تكنولوجيا الاتصالات يعتمد على مبادئ فيزيائية دقيقة. من اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية إلى تطوير الألياف البصرية، ومن الترانزستور إلى الاتصالات الكمومية، تظل الفيزياء هي المحرك الأساسي لكل هذه الثورات التكنولوجية.

تهدف هذه المقالة إلى استكشاف العلاقة العميقة بين الفيزياء وتطور تكنولوجيا الاتصالات، وكيف أن الاكتشافات الفيزيائية النظرية تحولت إلى تطبيقات عملية غيرت وجه الحياة البشرية. سنتناول في هذه الصفحات رحلة الاتصالات من أيامها الأولى البسيطة حتى العصر الرقمي المتقدم الذي نعيشه اليوم، مع التركيز على الأسس الفيزيائية التي مكنت كل قفزة نوعية في هذا المجال.

2- الأسس الفيزيائية للاتصالات

1.2- الموجات الكهرومغناطيسية: حجر الأساس

يعود الفضل في فهمنا للموجات الكهرومغناطيسية إلى العالم الأستكتلندي جيمس كلارك ماكسويل، الذي وضع في ستينيات القرن التاسع عشر معادلاته الشهيرة التي وحدت الكهرباء والمغناطيسية والضوء في إطار نظري واحد. أظهرت معادلات ماكسويل أن المجالات الكهربائية والمغناطيسية المتذبذبة يمكن أن تنتشر في الفضاء على شكل موجات، وأن سرعة انتشار هذه الموجات تساوي سرعة الضوء، مما قاده إلى استنتاج أن الضوء نفسه هو موجة كهرومغناطيسية.

جاء التأكيد التجريبي لنظرية ماكسويل على يد الفيزيائي الألماني هاينريش هيرتز عام 1887، عندما نجح في توليد واكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية في مختبره. استخدم هيرتز دائرة كهربائية متذبذبة لتوليد موجات راديوية، وكاشفاً بسيطاً لالتقاطها على مسافة بعيدة. أثبتت تجارب هيرتز أن الموجات الكهرومغناطيسية تتصرف مثل الضوء، حيث يمكن عكسها وانكسارها وحيودها، مما فتح الباب أمام استخدامها في الاتصالات اللاسلكية.

الطيف الكهرومغناطيسي يمتد من الموجات الراديوية ذات الأطوال الموجية الطويلة (من مئات الأمتار إلى كيلومترات) إلى أشعة جاما ذات الأطوال الموجية القصيرة جداً (أجزاء من النانومتر). كل نطاق من هذا الطيف له خصائص فيزيائية مميزة تجعله مناسباً لتطبيقات معينة في الاتصالات. فالموجات الراديوية ذات الترددات المنخفضة يمكنها الانتشار لمسافات طويلة والانحناء حول العوائق، بينما الموجات الميكروية والأشعة تحت الحمراء تستخدم في الاتصالات قصيرة المدى والألياف البصرية.

2.2- خصائص الموجات والتضمين

لنقل المعلومات عبر الموجات الكهرومغناطيسية، يجب تحويل الإشارة الأصلية (صوت، صورة، بيانات) إلى شكل يمكن إرساله عبر موجة حاملة. هذه العملية تسمى التضمين (Modulation)، وهي تعتمد على تغيير إحدى خصائص الموجة الحاملة بما يتناسب مع الإشارة المراد نقلها.

1.2.2- هناك ثلاثة أنواع رئيسية من التضمين التناظري:

- **تضمين السعة (AM - Amplitude Modulation):** في هذه الطريقة، يتم تغيير سعة (amplitude) الموجة الحاملة بما يتناسب مع الإشارة المراد نقلها. استخدمت هذه التقنية على نطاق

واسع في الإذاعة المبكرة ولا تزال مستخدمة في بعض التطبيقات. المعادلة الأساسية للتضمين السعوي هي $s(t) = [A_c + A_m(t)] \cos(2\pi f_c t)$ ، حيث A_c هي سعة الموجة الحاملة، $m(t)$ هي إشارة التضمين، و f_c هو تردد الموجة الحاملة.

- **تضمين التردد (FM - Frequency Modulation)**: هنا يتم تغيير تردد الموجة الحاملة بما يتناسب مع الإشارة. يوفر FM جودة صوت أفضل ومقاومة أكبر للتشويش مقارنة بـ AM، ولذلك يستخدم في البث الإذاعي عالي الجودة.

- **تضمين الطور (PM - Phase Modulation)**: يعتمد على تغيير طور الموجة الحاملة، وهو مشابه رياضياً لتضمين التردد.

أما في الاتصالات الرقمية الحديثة، فتستخدم تقنيات تضمين رقمية أكثر تعقيداً مثل QAM (Quadrature Amplitude Modulation) التي تجمع بين تضمين السعة والطور لنقل كميات كبيرة من البيانات بكفاءة عالية.

3.2- انتشار الموجات في الأوساط المختلفة

تتأثر الموجات الكهرومغناطيسية بالوسط الذي تنتشر فيه، وفهم هذه التأثيرات ضروري لتصميم أنظمة الاتصالات الفعالة. في الفضاء الحر، تنتشر الموجات في خطوط مستقيمة وتخضع لقانون التربيع العكسي، حيث تقل شدة الإشارة مع مربع المسافة.

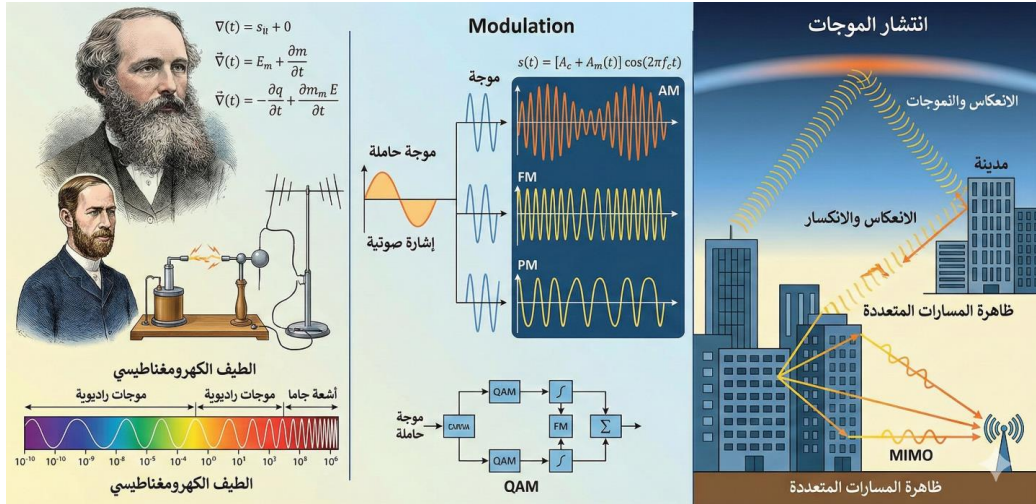
عند انتشار الموجات في الغلاف الجوي، تواجه عدة ظواهر فيزيائية:

- **الامتصاص الجوي**: تمتص جزيئات الهواء والماء بعض الترددات أكثر من غيرها. على سبيل المثال، يمتص بخار الماء والأكسجين الموجات الميكروية بشدة عند ترددات معينة.

- **الانكسار والانعكاس**: يمكن للموجات الراديوية ذات الترددات المنخفضة أن تنعكس عن طبقة الأيونوسفير، مما يسمح بالاتصالات طويلة المدى. هذه الخاصية استخدمت بكثرة في الإذاعة والاتصالات البحرية قبل عصر الأقمار الصناعية.

- **التشتت والحيود**: عند مواجهة العوائق، تنحني الموجات حولها بدرجات متفاوتة حسب طولها الموجي. الموجات الطويلة تحيد بشكل أفضل من الموجات القصيرة.

- ظاهرة المسارات المتعددة (Multipath) في البيئات الحضرية، تصل الإشارة إلى المستقبل عبر مسارات متعددة نتيجة الانعكاسات من المباني والأسطح المختلفة، مما قد يسبب تداخلاً بناءً أو هداماً. أدى فهم هذه الظاهرة إلى تطوير تقنيات متقدمة مثل MIMO (Multiple Input Multiple Output) التي تستغل المسارات المتعددة لزيادة سعة القناة.



3- من التلغراف إلى الراديو

1.3- التلغراف: أول نظام اتصالات كهربائي

يعتبر التلغراف الكهربائي نقطة البداية الحقيقية لعصر الاتصالات الحديثة. طور صمويل مورس في ثلاثينيات القرن التاسع عشر نظاماً تلغرافياً عملياً يعتمد على إرسال نبضات كهربائية عبر أسلاك نحاسية. استخدم مورس مبدأ فيزيائياً بسيطاً: عند إغلاق دائرة كهربائية، يتدفق التيار ويمكن اكتشافه على الطرف الآخر من السلك.

الفيزياء وراء التلغراف تتضمن عدة مبادئ:

- التوصيل الكهربائي: تنتقل الإلكترونات في الأسلاك النحاسية بسرعة قريبة من سرعة الضوء، مما يسمح بالاتصال شبه الفوري.
- الكهرومغناطيسية: استخدم مستقبل التلغراف ملفاً كهرومغناطيسياً يجذب قطعة معدنية عند مرور التيار، محدثاً نقرة مسموعة أو علامة على الورق.

- **المقاومة الكهربائية:** كانت المقاومة في الأسلاك الطويلة تسبب ضعف الإشارة، مما استدعى تطوير مرحلات (relays) لتقوية الإشارة على مسافات طويلة.

نجح مورس في إرسال أول رسالة تلغرافية بين واشنطن وبالتيمور عام 1844، معلناً بداية عصر جديد في الاتصالات. انتشرت شبكات التلغراف بسرعة في أوروبا وأمريكا، ثم امتدت عبر المحيط الأطلسي بوضع كابلات بحرية في ستينيات القرن التاسع عشر.

2.3- الهاتف: نقل الصوت كهربائياً

جاء الابتكار التالي على يد ألكسندر جراهام بيل الذي حصل على براءة اختراع الهاتف عام 1876. كانت الفكرة الأساسية هي تحويل الموجات الصوتية إلى تيار كهربائي متغير، ثم إعادة تحويل هذا التيار إلى صوت في الطرف المستقبل.

المبادئ الفيزيائية للهاتف الأولي تشمل:

- **التحويل الميكانيكي-الكهربائي:** استخدم الميكروفون الأول غشاءً رقيقاً يهتز مع الموجات الصوتية، محرراً ملفاً في مجال مغناطيسي، مما يولد تياراً كهربائياً متغيراً بنفس نمط الصوت (قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي).

- **التضخيم:** في الساعات المبكرة، يمر التيار الكهربائي عبر ملف يتحرك في مجال مغناطيسي، محرراً غشاءً ينتج الصوت.

- **انتقال الإشارة:** ينتقل التيار المتغير عبر أسلاك نحاسية، حاملاً معلومات الصوت كتغيرات في التيار.

كان التحدي الأكبر هو فقدان الإشارة على المسافات الطويلة. تم حل هذه المشكلة جزئياً بتطوير ملفات التحميل (loading coils) التي ابتكرها مايكل بوبين وجورج كامبل في مطلع القرن العشرين. هذه الملفات تعوض عن السعة الموزعة في الكابل، مما يحسن نقل الترددات الصوتية.

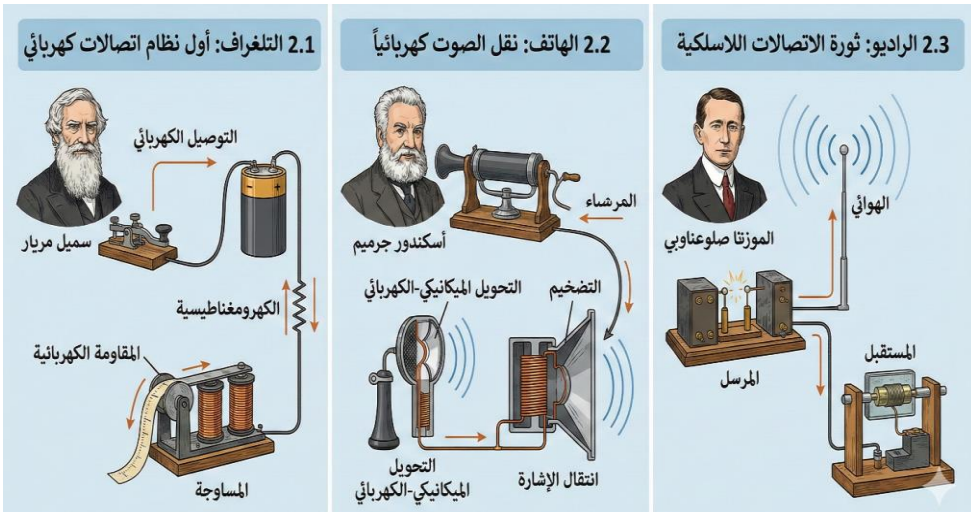
3.3- الراديو: ثورة الاتصالات اللاسلكية

بعد اكتشاف هيرتز للموجات الكهرومغناطيسية، كانت الخطوة التالية هي استخدامها للاتصال العملي. قام جوجليمو ماركوني في تسعينيات القرن التاسع عشر بتطوير أول نظام راديو عملي، مستفيداً من أعمال

هيرتز وآخرين. في عام 1901، نجح ماركوني في إرسال إشارة لاسلكية عبر المحيط الأطلسي، مثبتاً إمكانية الاتصالات اللاسلكية طويلة المدى.

المكونات الأساسية لنظام الراديو المبكر:

- **المرسل:** استخدم ماركوني مولد شرارة (spark gap) لتوليد موجات كهرومغناطيسية. عند تفريغ شحنة كهربائية عبر فجوة هوائية، تنتج تذبذبات كهرومغناطيسية سريعة تُشع عبر هوائي.
 - **الهوائي:** يحول الطاقة الكهربائية إلى موجات كهرومغناطيسية والعكس. تعتمد كفاءة الهوائي على نسبة طوله إلى الطول الموجي (عادة ربع أو نصف الطول الموجي للحصول على رنين).
 - **المستقبل:** استخدم كاشف الكوهيرر (coherer) في البداية، وهو أنبوب يحتوي على برادة معدنية تتماسك عند تعرضها لموجات راديوية، مما يسمح بمرور التيار.
- مع تطور الإلكترونيات، تم استبدال مولدات الشرارة بمذبذبات أكثر استقراراً، وتم تطوير كواشف أكثر حساسية مثل الديود الكريستالي ثم الصمامات المفرغة (vacuum tubes).



4- عصر الإلكترونيات

1.4- الصمامات المفرغة: البداية الحقيقية

اخترع جون أمبروز فليمنج الصمام الثنائي (diode) عام 1904، وهو أنبوب مفرغ يحتوي على قطبين: كاثود ساخن ينبعث منه إلكترونات، وأنود يجمعها. يسمح هذا الصمام بمرور التيار في اتجاه واحد فقط، مما يجعله مثالياً للكشف عن إشارات الراديو وتحويلها من تيار متردد إلى تيار مباشر.

أضاف لي دي فورست قطباً ثالثاً (الشبكة أو grid) عام 1906، مخترعاً الصمام الثلاثي (triode) القادر على التضخيم. بوضع جهد متغير صغير على الشبكة، يمكن التحكم في تيار كبير بين الكاثود والأنود، مما يوفر تضخيماً للإشارة. هذا الاختراع كان ثورياً، حيث مكّن من:

- تضخيم الإشارات الضعيفة في المستقبلات الراديوية.
- توليد موجات مستمرة مستقرة للإرسال.
- تطوير دوائر تذبذب (oscillators) ومزجات (mixers).
- إنشاء مكبرات صوت قوية للهواتف والإذاعة.

الفيزياء وراء الصمامات المفرغة تعتمد على الانبعاث الحراري للإلكترونات. عند تسخين معدن (عادةً مغطى بأكاسيد معينة)، تكتسب بعض الإلكترونات طاقة كافية للتغلب على دالة الشغل (work function) والهروب من سطح المعدن. في الفراغ، تتسارع هذه الإلكترونات نحو الأنود الموجب، محدثة تياراً كهربائياً.

2.4- الترانزستور: نقطة تحول في التاريخ

في عام 1947، اخترع جون باردين ووالتر براتين وويليام شوكلي في مختبرات بيل الترانزستور، وهو اختراع حاز على جائزة نوبل عام 1956 وغير وجه العالم التكنولوجي. الترانزستور عبارة عن جهاز من أشباه الموصلات يمكنه التضخيم والتبديل (switching) مثل الصمامات المفرغة، لكن بحجم أصغر بكثير، واستهلاك طاقة أقل، وموثوقية أعلى.

المبادئ الفيزيائية للترانزستورات:

- **أشباه الموصلات:** مواد مثل السيليكون والجرمانيوم لها موصلية كهربائية بين الموصلات والعوازل. يمكن التحكم في موصليتها بإضافة شوائب (doping) لإنشاء نوعين:

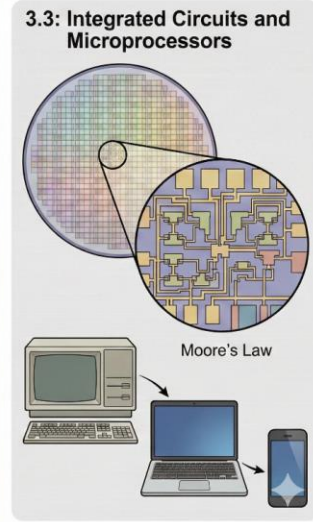
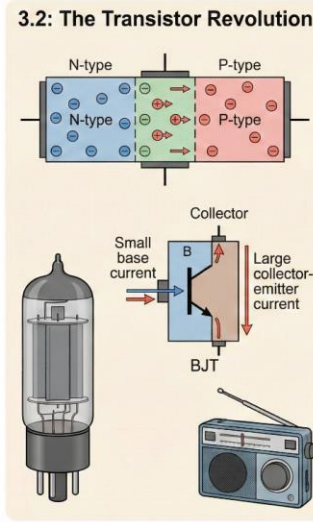
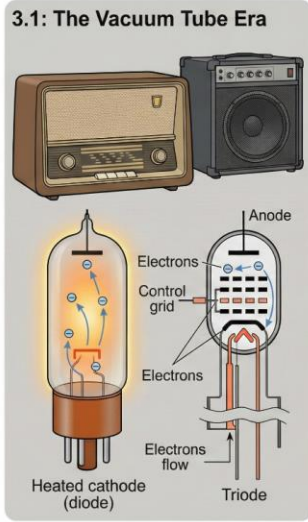
- ❖ النوع N: يحتوي على إلكترونات حرة إضافية (حاملات شحنة سالبة).
 - ❖ النوع P: يحتوي على فجوات (holes) تعمل كحاملات شحنة موجبة.
 - **وصلة PN:** عند التقاء منطقة P ومنطقة N ، تتشكل منطقة نضوب (depletion region) تعمل كحاجز للتيار في اتجاه واحد.
 - **الترانزستور ثنائي القطبية:** (BJT) يتكون من ثلاث طبقات (NPN) أو (PNP). بتطبيق تيار صغير على القاعدة (base) ، يمكن التحكم في تيار أكبر بكثير بين المجمع (collector) والباعث (emitter).
 - **ترانزستور تأثير المجال:** (FET) يستخدم مجالاً كهربائياً للتحكم في التيار، ويستهلك طاقة أقل من BJT ، مما جعله مثالياً للدوائر المتكاملة.
- أدى اختراع الترانزستور إلى ثورة في جميع مجالات الإلكترونيات، بما في ذلك الاتصالات. أصبحت أجهزة الراديو محمولة وصغيرة الحجم، وتطورت أنظمة الهاتف لتصبح أكثر كفاءة، ومهدت الطريق للحواسيب الرقمية.

3.4- الدوائر المتكاملة والمعالجات الدقيقة

في عام 1958، اخترع جاك كيلبي أول دائرة متكاملة (integrated circuit) ، حيث تم تصنيع عدة ترانزستورات ومقاومات ومكثفات على شريحة واحدة من السيليكون. بعد عام، طور روبرت نوييس تقنية أفضل باستخدام السيليكون الخالص والأكسدة. تطورت الدوائر المتكاملة بسرعة مذهلة، مصداقاً لقانون مور الذي توقع مضاعفة عدد الترانزستورات على الشريحة كل عامين تقريباً. هذا التطور أدى إلى:

معالجات أسرع وأكثر قوة: مكنت من معالجة كميات هائلة من البيانات في الوقت الفعلي ذاكرة أكبر بتكلفة أقل: سمحت بتخزين المزيد من المعلومات أجهزة أصغر حجماً: فتحت المجال للهواتف المحمولة والأجهزة القابلة للارتداء كفاءة طاقة أعلى: زادت عمر البطارية في الأجهزة المحمولة

في مجال الاتصالات، مكنت الدوائر المتكاملة من تطوير أنظمة معالجة إشارات رقمية (Digital - DSP) (Signal Processing) معقدة، وأجهزة تشفير، ومعالجات اتصالات متخصصة يمكنها التعامل مع بروتوكولات متعددة في وقت واحد.



5- الألياف البصرية

1.5- الفيزياء وراء الألياف البصرية

تمثل الألياف البصرية قفزة نوعية في تكنولوجيا الاتصالات، حيث تستخدم الضوء بدلاً من الإشارات الكهربائية لنقل المعلومات. المبدأ الأساسي هو الانعكاس الداخلي الكلي. (Total Internal Reflection). عندما ينتقل الضوء من وسط ذي معامل انكسار أعلى (n_1) إلى وسط ذي معامل انكسار أقل (n_2) ، ينكسر بعيداً عن العمود. عند زاوية سقوط معينة تسمى الزاوية الحرجة (θ_c) ، ينكسر الضوء بزاوية 90 درجة. عند زوايا أكبر من الزاوية الحرجة، لا يخرج الضوء من الوسط الأول بل ينعكس كلياً داخله. الزاوية الحرجة تُحسب من العلاقة $\sin(\theta_c) = n_2/n_1$:

- الألياف البصرية عبارة عن خيوط رفيعة جداً من الزجاج أو البلاستيك النقي للغاية، تتكون من:

القلب (Core): الجزء المركزي بمعامل انكسار أعلى، يحمل معظم الضوء الغلاف: (Cladding) طبقة خارجية بمعامل انكسار أقل، تحبس الضوء داخل القلب الغطاء الواقي: (Coating) طبقة بلاستيكية تحمي الليف من الرطوبة والتلف الميكانيكي

2.5 - أنواع الألياف البصرية

- **الألياف أحادية النمط (Single-mode fiber):** لها قلب رفيع جداً (8-10 ميكرومتر)، يسمح فقط لنمط واحد من الضوء بالانتشار. تستخدم للمسافات الطويلة (عشرات إلى مئات الكيلومترات) بسبب التشتت المنخفض.
- **الألياف متعددة الأنماط (Multi-mode fiber):** لها قلب أكبر (50-62.5 ميكرومتر)، يسمح بانتشار عدة أنماط ضوئية. أرخص وأسهل في التركيب لكن أقصر مدى بسبب التشتت النمطي.

3.5- المزايا الفيزيائية للألياف البصرية

- **سعة نطاق هائلة:** يمكن للألياف البصرية نقل تيرابايتات من البيانات في الثانية. السبب الفيزيائي هو أن تردد الضوء (حوالي 200 تيراهرتز) أعلى بكثير من الموجات الراديوية، مما يسمح بنطاق ترددي أوسع بكثير.
- **فقدان إشارة منخفض:** الألياف الحديثة تفقد أقل من 0.2 ديسيبل/كيلومتر عند طول موجي 1550 نانومتر. هذا يعني أن الإشارة يمكن أن تنتقل لأكثر من 100 كيلومتر دون الحاجة لتضخيم.
- **مقاومة التداخل الكهرومغناطيسي:** الضوء لا يتأثر بالمجالات الكهرومغناطيسية الخارجية، مما يجعل الألياف مثالية للبيئات الصناعية.
- **الأمان:** من الصعب التنصت على الألياف البصرية دون كسرها أو التسبب في فقدان ملحوظ للإشارة.
- **حجم ووزن أقل:** ليف بصري بسمك شعرة يمكنه حمل نفس كمية المعلومات التي يحملها كابل نحاسي بسمك إصبع.

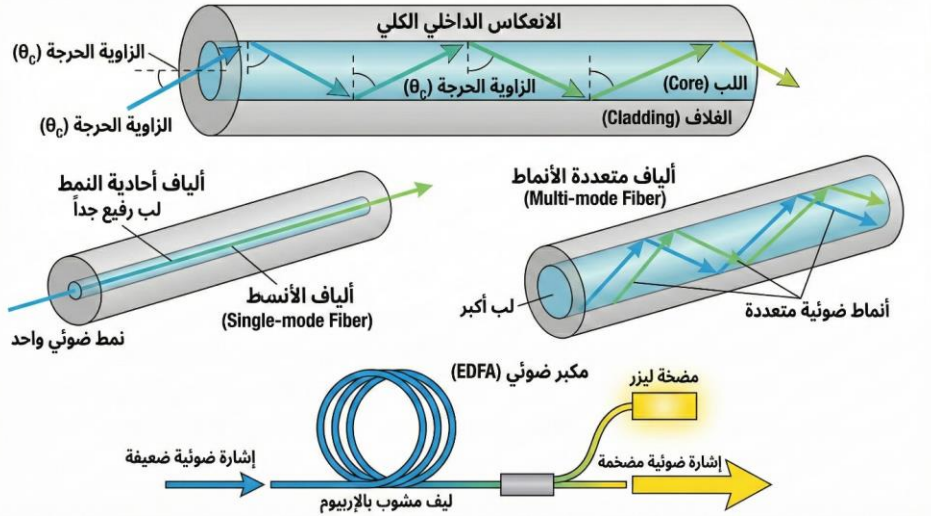
4.5- تقنيات التضمين الضوئي

- يتم تحويل البيانات الرقمية إلى نبضات ضوئية باستخدام مضمنات (modulators) ضوئية. التقنيات الأساسية تشمل:
 - **التضمين بالشدة (Intensity Modulation):** تشغيل وإطفاء الليزر أو LED لتمثيل الأصفار والأحاد.

- تقسيم الطول الموجي (WDM - Wavelength Division Multiplexing) إرسال عدة إشارات بأطوال موجية مختلفة في نفس الليف، مما يضاعف السعة بشكل هائل التضمين الطوري: استخدام طور الموجة الضوئية لحمل المعلومات.

5.5- المكبرات الضوئية

لتعويض فقدان الإشارة على المسافات الطويلة جداً، يتم استخدام مكبرات ألياف مشوبة بالإربيوم (EDFA - Erbium-Doped Fiber Amplifier). تعمل هذه المكبرات بضخ طاقة ضوئية (عادة من ليزر بطول موجي 980 أو 1480 نانومتر) في ليف يحتوي على أيونات الإربيوم. تمتص أيونات الإربيوم طاقة الضخ وتنتقل إلى حالات طاقة أعلى. عندما تمر إشارة ضوئية ضعيفة، تحفز الأيونات المثارة على إصدار فوتونات إضافية بنفس التردد والطور، مما يضخم الإشارة مباشرة دون الحاجة لتحويلها إلى كهربائية.



6- الاتصالات اللاسلكية الحديثة

1.6- الهواتف المحمولة: من 1G إلى 5G

1.1.6- الجيل الأول (1G) الثمانيات: (كانت أنظمة تناظرية تستخدم تضمين التردد (FM) لنقل الصوت. استخدمت تقنية FDMA (تعدد الوصول بتقسيم التردد) حيث يُخصص تردد منفصل لكل مكالمة.

2.1.6-الجيل الثاني (2G) التسعينيات : التحول إلى الرقمية باستخدام GSM و CDMA.تضمنت تقنيات مثل:

- ❖ TDMA(تعدد الوصول بتقسيم الزمن): تقسيم قناة واحدة إلى فترات زمنية متعددة.
 - ❖ CDMA(تعدد الوصول بتقسيم الشفرة): استخدام رموز تفريد فريدة لكل مستخدم، مما يسمح لعدة مستخدمين بمشاركة نفس التردد والوقت.
- 3.1.6- الجيل الثالث (3G) أوائل الألفية الثانية :** (جلب سرعات بيانات أعلى (حتى 2 ميجابت/ثانية) باستخدام CDMA محسنة و WCDMA مكن من تصفح الإنترنت ومكالمات الفيديو.

4.1.6- الجيل الرابع (4G LTE) : العقد الأول من القرن 21 : (ثورة حقيقية مع سرعات تصل إلى 100 ميجابت/ثانية للأجهزة المتحركة و 1 جيجابت/ثانية للأجهزة الثابتة. التقنيات الأساسية:

- ❖ OFDMA(تعدد الوصول بتقسيم التردد المتعامد): تقسيم القناة إلى عدة موجات حاملة متعامدة، مما يقلل التداخل ويزيد الكفاءة.
 - ❖ MIMO استخدام هوائيات متعددة للإرسال والاستقبال، مما يزيد السعة والموثوقية.
- 5.1.6- الجيل الخامس (5G) من 2019 :** (يستهدف سرعات تصل إلى 20 جيجابت/ثانية مع تأخير أقل من ميلي ثانية. الابتكارات الفيزيائية:

- ❖ الموجات المليمترية (mmWave) استخدام ترددات 24-100 جيجاهرتز، توفر نطاق ترددي ضخم لكن مدى أقصر.
- ❖ تشكيل الحزمة (Beamforming) توجيه إشارات الراديو مباشرة نحو الأجهزة بدلاً من البث في جميع الاتجاهات
- ❖ Massive MIMO استخدام عشرات أو مئات الهوائيات في المحطة الأساسية

2.6- الفيزياء وراء MIMO

تعدد المدخلات والمخرجات (MIMO) هو تقنية ثورية تستغل ظاهرة المسارات المتعددة التي كانت تعتبر سابقاً مشكلة. في بيئة حضرية، تنعكس الإشارة عن المباني والأسطح، وتصل إلى المستقبل عبر مسارات متعددة بتأخيرات وأطوار مختلفة. في نظام MIMO ، يستخدم كل من المرسل والمستقبل هوائيات متعددة. كل زوج من الهوائيات يشكل قناة مستقلة إحصائياً. باستخدام معالجة إشارات متقدمة، يمكن للنظام:

تعدد الإرسال المكاني (Spatial Multiplexing): إرسال تيارات بيانات مختلفة من هوائيات مختلفة في نفس الوقت وعلى نفس التردد، مما يضاعف السعة

التنوع المكاني (Spatial Diversity): إرسال نفس البيانات من عدة هوائيات، مما يحسن الموثوقية

من الناحية الرياضية، يمكن تمثيل قناة MIMO بمصفوفة H حيث يمثل كل عنصر H_{ij} القناة من الهوائي i في المرسل إلى الهوائي j في المستقبل. معادلة الاستقبال $y = Hx + n$ ، حيث x هو الإشارة المرسلة و n هو الضوضاء.

3.6- الموجات المليمترية والتحديات الفيزيائية

تستخدم شبكات 5G ترددات أعلى بكثير من الأجيال السابقة، في نطاق الموجات المليمترية (24-100 جيجاهرتز). هذا يوفر نطاق ترددي واسع جداً، لكنه يأتي مع تحديات فيزيائية:

فقدان انتشار أعلى: تخضع الموجات لقانون فقدان المسار $PL = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + C$ ، حيث d هي المسافة و f هو التردد. مع زيادة التردد، يزداد الفقدان بشكل كبير.

امتصاص جوي: الأكسجين وبخار الماء يمتصان الموجات المليمترية بشدة عند ترددات معينة (مثل 60 جيجاهرتز).

حساسية للعوائق: لا تخترق الموجات المليمترية الجدران والمباني بسهولة، وتعاني من الانعكاسات والانحرافات.

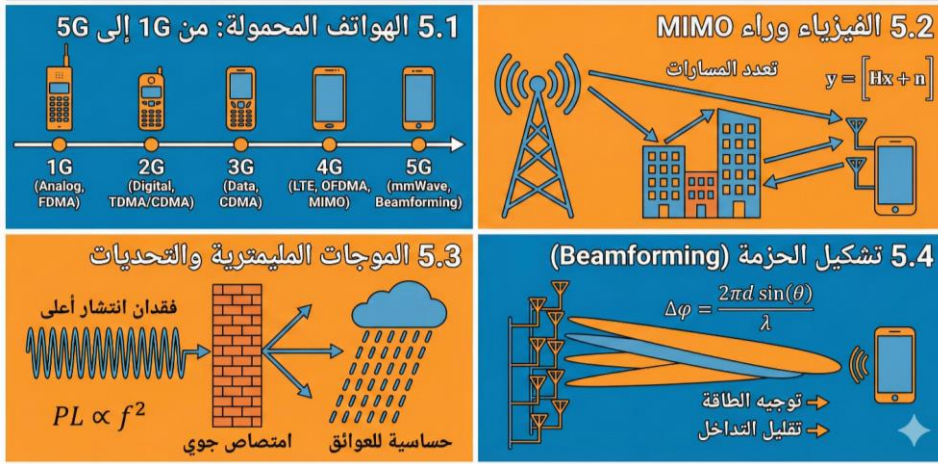
الحل: استخدام خلايا صغيرة كثيفة (small cells) وتقنيات تشكيل الحزمة لتوجيه الإشارات بدقة.

4.6- تشكيل الحزمة (Beamforming)

بدلاً من بث الإشارات في جميع الاتجاهات (omnidirectional)، يستخدم تشكيل الحزمة هوائيات مصفوفة (antenna array) للتحكم في اتجاه الإشارة. المبدأ الفيزيائي هو التداخل البناء والهدام. عند إرسال نفس الإشارة من عدة هوائيات بفوارق طورية محسوبة بعناية، تتداخل الموجات بشكل بناء في اتجاه معين (تشكيل حزمة ضيقة) وبشكل هدام في اتجاهات أخرى. فرق الطور المطلوب يُحسب من $\Delta\phi$: $(2\pi d \sin(\theta))/\lambda = \Delta\phi$ ، حيث d هي المسافة بين الهوائيات، θ هي الزاوية المطلوبة، و λ هو الطول الموجي.

هذا يسمح بـ:

- توجيه الطاقة نحو المستخدم المقصود، مما يحسن جودة الإشارة.
- تقليل التداخل مع المستخدمين الآخرين.
- تتبع المستخدمين المتحركين ديناميكياً.



7- الأقمار الصناعية والاتصالات الفضائية

1.7- الفيزياء المدارية والأقمار الصناعية

تعتمد الأقمار الصناعية للاتصالات على مبادئ الميكانيكا السماوية التي وضعها نيوتن وكبلر. القوة الجاذبية بين القمر والأرض توفر القوة المركزية اللازمة للحركة المدارية. في مدار دائري، تساوي قوة الجاذبية القوة المركزية $GMm/r^2 = mv^2/r$ ، حيث G ثابت الجاذبية، M كتلة الأرض، m كتلة القمر، r نصف قطر المدار، و v السرعة المدارية.

من هذه المعادلة، نحصل على السرعة المدارية $v = \sqrt{GM/r}$ ، والفترة المدارية $T = 2\pi r/v = 2\pi\sqrt{r^3/GM}$.

المدار الثابت بالنسبة للأرض (GEO) على ارتفاع حوالي 35,786 كيلومتر فوق خط الاستواء، تساوي فترة دوران القمر فترة دوران الأرض (24 ساعة)، مما يجعله يظهر ثابتاً في السماء. هذا مثالي للبث التلفزيوني والاتصالات حيث يمكن توجيه الهوائيات بشكل ثابت. لكن العيب هو التأخير العالي (حوالي 240 ميلي ثانية ذهاباً وإياباً) بسبب المسافة الكبيرة.

المدار المنخفض (LEO) على ارتفاع 500-2000 كيلومتر، توفر هذه الأقمار تأخيراً أقل بكثير (20-40 ميلي ثانية) لكنها تتحرك بسرعة عبر السماء، مما يتطلب شبكات من مئات أو آلاف الأقمار) مثل Starlink وOneWeb.

المدار المتوسط (MEO) يستخدم في أنظمة الملاحة مثل GPS على ارتفاع حوالي 20,000 كيلومتر.

2.7- التحديات الفيزيائية للاتصال الفضائي

فقدان المسار الحر (Free Space Path Loss): يزداد الفقدان مع مربع المسافة وفقاً للمعادلة:
$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(4\pi/c).$$
 الفقدان إلى 200 ديسيبل.

تأثير دوبلر: بسبب الحركة النسبية للأقمار في LEO، يحدث انزياح في التردد $\Delta f = (v/c)f_0$ ، حيث v هي السرعة النسبية. يجب تعويض هذا الانزياح لاستقبال الإشارات بشكل صحيح.

الضوضاء: تشمل ضوضاء الفضاء الكوني، والإشعاع الحراري من الأرض والشمس، والضوضاء الحرارية في المستقبلات.

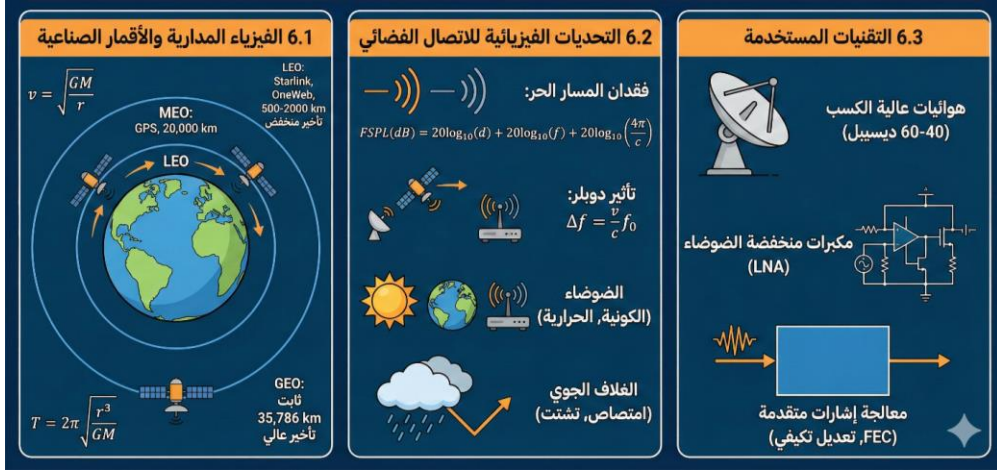
الغلاف الجوي: بسبب امتصاصاً وتشتتاً للموجات، خاصة في وجود الأمطار والسحب.

3.7- التقنيات المستخدمة

هوائيات عالية الكسب: تستخدم هوائيات طبقية (dish antennas) كبيرة ذات كسب عالي (40-60 ديسيبل) لتركيز الطاقة وزيادة حساسية الاستقبال.

مكبرات منخفضة الضوضاء (LNA): توضع في مقدمة المستقبل لتضخيم الإشارة الضعيفة قبل أن تفسدها الضوضاء من المكونات التالية.

معالجة إشارات متقدمة: تقنيات مثل ترميز الخطأ الأمامي (FEC) وتعديل تكميفي لمواجهة ظروف القناة المتغيرة.



8- الإنترنت والشبكات

1.8- البنية التحتية المادية للإنترنت

الإنترنت ليس سحابة افتراضية، بل شبكة مادية ضخمة من الكابلات والموجهات والمحولات. العمود الفقري للإنترنت العالمي يتكون من كابلات ألياف بصرية بحرية تربط القارات. يوجد حالياً أكثر من 400 كابل بحري، بطول إجمالي يزيد عن 1.3 مليون كيلومتر.

هذه الكابلات تواجه تحديات فيزيائية فريدة:

الضغط: في أعماق المحيطات (حتى 8000 متر)، يصل الضغط إلى أكثر من 800 ضغط جوي، مما يتطلب تصميماً قوياً.

الحرارة: تغيرات درجة الحرارة تؤثر على الألياف. يتم استخدام معادن خاصة في تصميم الكابل لتقليل التمدد والانكماش.

التيارات البحرية: يجب تثبيت الكابلات بعناية ودفنها في قاع البحر حيثما أمكن.

2.8- فيزياء الشبكات اللاسلكية (WiFi)

تستخدم شبكات WiFi ترددات 2.4 و 5 و 6 جيجاهرتز في WiFi 6E لنقل البيانات لاسلكياً. المعايير المختلفة (802.11a/b/g/n/ac/ax) تستخدم تقنيات فيزيائية متنوعة:

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing): تقسيم القناة إلى عشرات أو مئات من الموجات الحاملة الفرعية المتعامدة. هذا يقاوم التداخل متعدد المسارات ويسمح بمعدلات بيانات عالية.

التشكيل التكيفي: ضبط مخطط التضمين (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM) ديناميكياً حسب جودة الإشارة. في ظروف جيدة، يتم استخدام تشكيل عالي الكثافة لنقل المزيد من البيانات، وفي ظروف سيئة، يتم التراجع إلى تشكيل أكثر قوة.

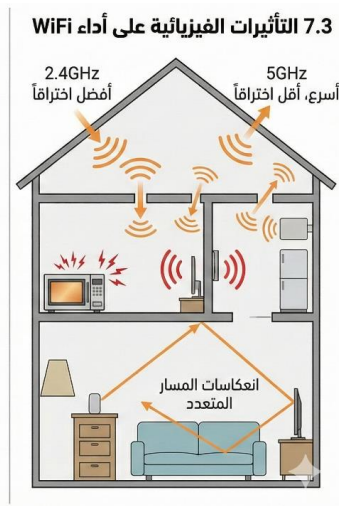
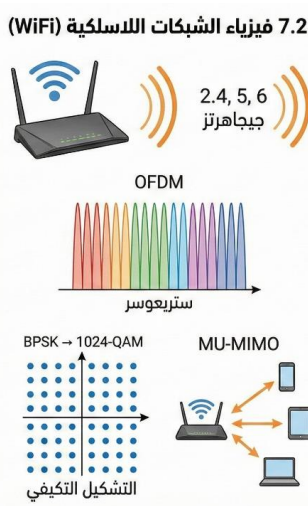
MU-MIMO (Multi-User MIMO) السماح للموجه بالتواصل مع عدة أجهزة في وقت واحد بدلاً من التناوب بينها.

3.8- التأثيرات الفيزيائية على أداء WiFi

الانتشار في المباني: تخترق موجات 2.4 جيجاهرتز الجدران والأسطح أفضل من موجات 5 جيجاهرتز، لكنها أبطأ وأكثر ازدحاماً.

التداخل: الأجهزة الأخرى التي تعمل على نفس الترددات (أفران الميكروويف، أجهزة Bluetooth، شبكات WiFi المجاورة) تسبب تداخلاً.

انعكاسات المسار المتعدد: في البيئات الداخلية، تنعكس الإشارات عن الجدران والأثاث، مما يخلق مسارات متعددة يمكن أن تتداخل بشكل بناء أو هدام.



9- الأمن والتشفير الكومومي

1.9- التشفير الكلاسيكي والفيزياء

معظم أنظمة التشفير الحديثة تعتمد على صعوبة رياضية) مثل تحليل الأعداد الكبيرة إلى عواملها الأولية في(RSA ، لكن هذا ليس آمناً من الناحية الفيزيائية ضد الحواسيب الكومومية المستقبلية.

2.9- توزيع المفاتيح الكومومية (QKD)

توزيع المفاتيح الكومومية يستخدم مبادئ ميكانيكا الكم لتوليد وتوزيع مفاتيح تشفير بطريقة آمنة فيزيائياً. البروتوكول الأشهر هو BB84 الذي اقترحه بينيت وبراسارد عام 1984.

المبادئ الكومومية الأساسية:

استقطاب الفوتون: يمكن استقطاب الفوتون في اتجاهات مختلفة (أفقي، رأسي، قطري +45°، قطري -45°).

مبدأ عدم التحديد: لا يمكن قياس استقطاب الفوتون بدقة في قاعدتين غير متوافقتين في وقت واحد. إذا قست الاستقطاب الأفقي/الرأسي، لا يمكنك معرفة الاستقطاب القطري.

عدم الاستنساخ: لا يمكن استنساخ حالة كمومية مجهولة. (no-cloning theorem) هذا يعني أن المتنصت لا يمكنه نسخ الفوتونات دون التأثير عليها.

كيف يعمل BB84:

- يرسل أليس سلسلة من الفوتونات إلى بوب، كل فوتون مستقطب عشوائياً في إحدى أربع حالات.
- يقيس بوب كل فوتون باستخدام قاعدة قياس مختارة عشوائياً.
- يقارن أليس وبوب علناً (دون الكشف عن النتائج) القواعد المستخدمة، ويحتفظان فقط بالحالات التي استخدمها فيها نفس القاعدة.
- يستخدمان عينة من البيانات المتبقية للتحقق من وجود تنصت - أي تنصت سيسبب أخطاء ملحوظة بسبب اضطراب الحالات الكومومية.

3.9- التحديات الفيزيائية لـ QKD

فقدان الفوتون: في الألياف البصرية، تُفقد الفوتونات بمعدل أسي مع المسافة. لا يمكن استخدام مكبرات عادية لأنها ستدمر الحالة الكومومية.

الضوضاء: الفوتونات الضالة من الضوء البيئي أو الانبعاثات الحرارية تسبب أخطاء.

كفاءة الكاشف: لا تكتشف الكواشف الحالية كل فوتون، مما يحد من معدل توليد المفتاح.

الحل: استخدام مراحل كمومية (quantum repeaters) التي يمكنها إطالة المدى دون كسر الأمان الكوموي، لكن هذه التقنية لا تزال قيد البحث.

8.1 التشفير الكلاسيكي والفيزياء

$N = p \cdot q$
 $n = \frac{1}{2} \cdot 40$
 $n = q$

التشفير الكلاسيكي المتشويش
التشفير الكلاسيكي والفيزياء

تحدي الحوسبة الكومومية المستقبلية

8.2 توزيع المفاتيح الكومومية (QKD) - BB84

بيطار العتنون فوتون الفواد

أليس بوب

متنصت

مقارنة	نتيجة القياس	اختيار السس	أرسل الفوتون	اختيار السس	القياس	القياس
000	+	+	+	+	+	+
101	+	+	+	+	+	+
100	+	+	+	+	+	+
...
011	0	+	+45°	+	+	+
011	1	+	-45°	+	+	+

مفتاح كومومي آمن

8.3 التحديات الفيزيائية لـ QKD

فقدان الفوتون

عدال الممتدلة

الضوضاء

الفوتون فوتون مكون لثلاث أصحى ويصن أخطاء

كفاءة الكاشف

لا تكتشف كل فوتون

مرحل كومومي

من حلل السقفاء الاستده في حلوقة لمرجع

10- الذكاء الاصطناعي ومعالجة الإشارات

1.10- الشبكات العصبية في الاتصالات

أصبح الذكاء الاصطناعي، وخاصة الشبكات العصبية العميقة، جزءاً لا يتجزأ من أنظمة الاتصالات الحديثة. التطبيقات تشمل:

تقدير القناة: (Channel Estimation) استخدام شبكات عصبية للتنبؤ بخصائص القناة اللاسلكية، والتي تتغير باستمرار بسبب الحركة والبيئة.

كشف الإشارة: (Signal Detection) في ظروف الضوضاء العالية أو التداخل المعقد، يمكن للشبكات العصبية أن تتفوق على الخوارزميات الكلاسيكية.

ترميز المصدر: (Source Coding) ضغط البيانات (الصور، الفيديو، الصوت) بكفاءة أعلى من الطرق التقليدية.

2.10- الفيزياء وراء الشبكات العصبية

رغم أن الشبكات العصبية غالباً ما تُعتبر خوارزميات برمجية، إلا أن تنفيذها يعتمد على فيزياء أشباه الموصلات. الحسابات المكثفة تتطلب معالجات متخصصة:

- GPUs (Graphics Processing Units) مصممة أصلاً للرسومات، تحتوي على آلاف النوى الصغيرة التي يمكنها إجراء عمليات متوازية، مثالية لضرب المصفوفات في الشبكات العصبية.

- TPUs (Tensor Processing Units) معالجات مخصصة من Google لتسريع عمليات التعلم الآلي.

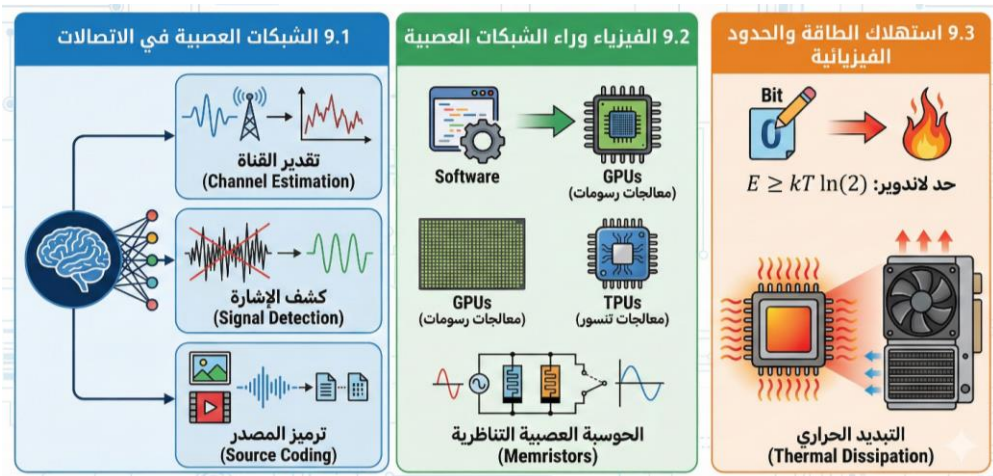
الحوسبة العصبية التناظرية: أبحاث حديثة تستكشف استخدام الدوائر التناظرية) مثل مصفوفات memristor لتتفيذ عمليات الشبكات العصبية بكفاءة طاقة أعلى بكثير.

3.10- استهلاك الطاقة والحدود الفيزيائية

تواجه الحوسبة حدوداً فيزيائية أساسية:

حد لاندوير (Landauer's Principle): ينص على أن محو معلومة واحدة (bit) يتطلب تبديد طاقة لا تقل عن $kT \ln(2)$ من الحرارة، حيث k ثابت بولتزمان و T درجة الحرارة المطلقة. عند درجة حرارة الغرفة، هذا يعادل حوالي 2.9×10^{-21} جول لكل بت.

التبديد الحراري: المعالجات الحديثة تبديد عشرات إلى مئات الواطات، مما يتطلب تبريداً متطوراً. هذا يحد من كثافة الترانزستورات وسرعة الساعة.



11- مستقبل الاتصالات

1.11- الاتصالات الكمية

بعد QKD ، الخطوة التالية هي الإنترنت الكمي الكامل الذي يمكنه نقل الحالات الكمية (qubits) بين عقد بعيدة. هذا ممكن من:

الحوسبة الكمية الموزعة: ربط حواسيب كمية متعددة لحل مسائل أكبر القياسات الكمية الموزعة: تحسين دقة أجهزة الاستشعار والتلسكوبات البروتوكولات الكمية: مثل التصويت الآمن والتوقيع الرقمي الكمي

التحديات الفيزيائية:

- التشابك عبر مسافات طويلة: الحالات المتشابكة هشة للغاية وتتحلل بسرعة. الحل المقترح هو المرحلات الكمية التي تستخدم التشابك المتبادل (entanglement swapping) لتوسيع المدى.
- الذاكرة الكمية: الحاجة لتخزين الحالات الكمية لفترات كافية لإجراء العمليات والاتصالات.

1.11- الاتصالات بالتيار متر

النطاق الترددي بين الموجات المليمترية والأشعة تحت الحمراء (0.1-10 تيراهرتز) لا يزال غير مستغل إلى حد كبير. يوفر هذا النطاق إمكانيات هائلة:

سعة نطاق ضخمة: يمكن أن تصل معدلات البيانات إلى تيرابايتات في الثانية تطبيقات جديدة: التصوير الطبي، الأمن، الاستشعار

التحديات:

توليد واكتشاف THz: يقع هذا النطاق في "فجوة التيراهرتز" حيث تفشل تقنيات الإلكترونيات والبصريات التقليدية. تتطلب مصادر وكواشف متخصصة مثل مذبذبات النفق الرنانة (RTDs) والكواشف bolometer.

الامتصاص الجوي القوي: بخار الماء يمتص موجات THz بشدة، مما يحد من الاستخدام في الهواء الطلق.

- 10.3 Li-Fi الاتصالات بالضوء المرئي.
 - تستخدم Li-Fi مصابيح LED للإضاءة في نفس الوقت لنقل البيانات عن طريق تعديل شدة الضوء بسرعة عالية (غير مرئية للعين البشرية). المزايا:
- نطاق ترددي غير مرخص وغير مزدحم أمان محسّن: الضوء لا يخترق الجدران تجنب التداخل الكهرومغناطيسي

القيود:

يتطلب خط رؤية مباشر لا يعمل في ضوء الشمس القوي محدود للاستخدام الداخلي

3.11- الهولوجرافيا والتواجد عن بعد

تسمح سرعات الاتصال المتزايدة بنقل كميات ضخمة من البيانات المطلوبة للصور المجسمة (holograms) في الوقت الفعلي. الفيزياء وراء الهولوجرافيا:

التداخل: تسجيل نمط التداخل بين شعاع مرجعي وشعاع مبعثر من الجسم الحيود: إعادة بناء الصورة ثلاثية الأبعاد عن طريق إضاءة الهولوجرام بشعاع مناسب.

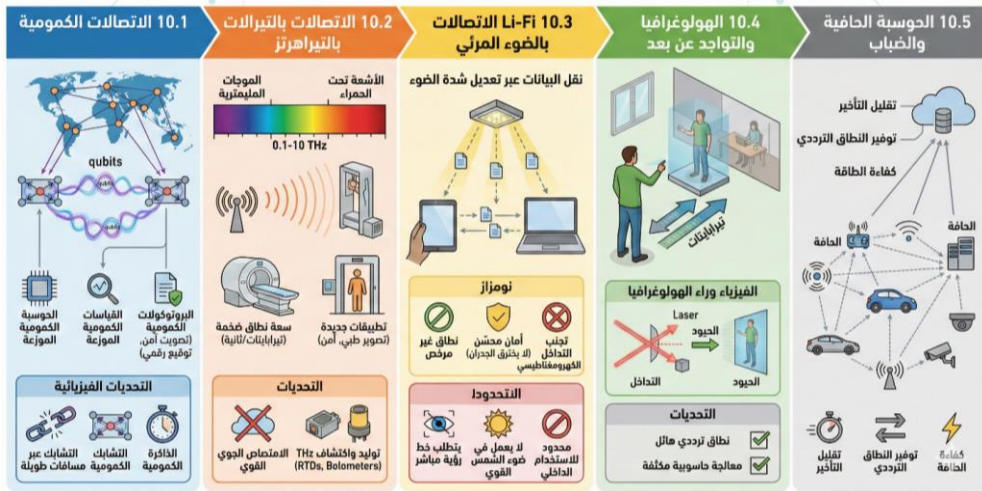
التحديات: نقل صورة هولوجرافية كاملة يتطلب نطاقاً ترددياً هائلاً (تيرابايتات)، ومعالجة حاسوبية مكثفة.

4.11- الحوسبة الحافية والضباب

مع زيادة الأجهزة المتصلة (إنترنت الأشياء IoT) - ، يصبح من غير العملي إرسال كل البيانات إلى السحابة. الحوسبة الحافية (Edge Computing) تنقل المعالجة إلى حافة الشبكة، قريباً من مصدر البيانات.

من منظور فيزيائي:

تقليل التأخير: البيانات لا تحتاج للسفر إلى مراكز بيانات بعيدة توفير النطاق الترددي: معالجة البيانات محلياً تقلل حركة المرور في الشبكة كفاءة الطاقة: تقليل نقل البيانات يوفر الطاقة.



12- التأثيرات الصحية للإشعاع الكهرومغناطيسي

1.12- طبيعة الإشعاع من أجهزة الاتصالات

تصدر الهواتف المحمولة ومحطات البث اللاسلكية إشعاعاً كهرومغناطيسياً في نطاق الموجات الراديوية والميكروية) من حوالي 800 ميغاهرتز إلى 5 جيجاهرتز للهواتف، وحتى 100 جيجاهرتز في شبكات 5G). من المهم فهم أن هذا النوع من الإشعاع يختلف جوهرياً عن الإشعاع المؤين (مثل الأشعة السينية وأشعة جاما).

الفرق الفيزيائي الأساسي:

الإشعاع غير المؤين (Non-ionizing): طاقة الفوتون منخفضة جداً (أقل من 10 إلكترون فولت)، لا تكفي لنزع الإلكترونات من الذرات أو كسر الروابط الكيميائية في DNA. الطاقة تُحسب من $E = hf$ ،

حيث h ثابت بلانك و f التردد. عند تردد 2 جيجاهرتز (نموذجي للهواتف)، طاقة الفوتون حوالي 8.3×10^{-6} إلكترون فولت.

الإشعاع المؤين (Ionizing): طاقة عالية (أكثر من 10 إلكترون فولت)، يمكنه تأيين الذرات وإتلاف DNA مباشرة، مسبباً السرطان.

2.12- الآليات الفيزيائية للتفاعل مع الأنسجة

التأثير الفيزيائي المؤكد للموجات الراديوية على الأنسجة الحية هو التسخين الحراري (Thermal Effect):

امتصاص الطاقة: عندما تخترق الموجات الكهرومغناطيسية الجسم، تتفاعل مع الجزيئات المشحونة والثنائية القطب (خاصة الماء). الجزيئات تحاول الاصطفاف مع المجال الكهربائي المتذبذب، مما يسبب احتكاكاً وتوليد حرارة.

معدل الامتصاص النوعي (SAR - Specific Absorption Rate) يُقاس بوحدة واط/كيلوجرام، ويمثل الطاقة الممتصة لكل كتلة من النسيج. الحد الآمن المعتمد دولياً:

- المعيار الأمريكي (FCC) - لكل 1 جرام من النسيج 1.6 واط/كجم) .
 - المعيار الأوروبي (ICNIRP) - لكل 10 جرام من النسيج 2.0 واط/كجم) .
- عمق الاختراق: يعتمد على التردد والنسيج. عند 900 ميجاهرتز، عمق الاختراق في الدماغ حوالي 4-5 سم. عند 2 جيجاهرتز، ينخفض إلى حوالي 2-3 سم. الموجات المليمترية في 5 (28-100 جيجاهرتز) تُمتص بشكل شبه كامل في الطبقات السطحية من الجلد (أقل من 1 ملم).

3.12- الدراسات العلمية والأدلة الحالية

أُجريت آلاف الدراسات العلمية على مدار عقود لتقييم المخاطر الصحية المحتملة. المنظمات الصحية الدولية الرئيسية) منظمة الصحة العالمية WHO ، الوكالة الدولية لبحوث السرطان (IARC) راجعت هذه الأدلة:

التأثيرات الحرارية (مؤكدة علمياً):

- التعرض لمستويات SAR عالية جداً (أعلى من الحدود القانونية) يمكن أن يسبب ارتفاعاً في درجة حرارة الأنسجة بأكثر من 1 درجة مئوية.
- هذا يمكن أن يؤدي إلى تأثيرات فسيولوجية مثل التعب والصداع.
- جميع الأجهزة المعتمدة تُصمم لتبقى أقل بكثير من هذه المستويات.

السرطان:

- صنفت IARC عام 2011 الموجات الراديوية كـ"محتمل التسبب بالسرطان للإنسان".
- الدراسات الوبائية الكبرى مثل دراسة INTERPHONE ودراسة Million Women لم تجد دليلاً قاطعاً على زيادة خطر أورام الدماغ بين مستخدمي الهواتف العاديين.
- دراسة NTP الأمريكية على الفئران (2018) أظهرت زيادة طفيفة في بعض الأورام عند تعرض عالٍ جداً (9 ساعات يومياً، SAR أعلى من الحدود البشرية، لكن النتائج لا تُطبق مباشرة على البشر).

التأثيرات غير الحرارية (مثيرة للجدل):

- بعض الدراسات المخبرية أشارت لتأثيرات على النشاط الكهربائي للدماغ، جودة النوم، الخصوبة عند الرجال.
- هذه الدراسات متناقضة وصعبة التكرار.
- الآليات الفيزيائية غير واضحة.

الخلاصة العلمية الحالية:

- لا دليل علمي قاطع على أضرار صحية خطيرة من التعرض ضمن الحدود المعتمدة.
- الأدلة غير كافية لاستبعاد المخاطر طويلة المدى بشكل نهائي.
- الحاجة لمزيد من البحث، خاصة على التعرض طويل الأمد والأطفال.

4.12- التأثيرات الخاصة بالأطفال

الأطفال قد يكونون أكثر حساسية للإشعاع الكهرومغناطيسي لعدة أسباب فيزيائية:

- جماجم أرق: امتصاص أعلى للطاقة في الدماغ (قد يصل لضعف امتصاص البالغين في بعض مناطق الدماغ).
- أنسجة أكثر موصليّة: محتوى مائي أعلى في أنسجة الأطفال.

- تعرض تراكمي أطول: الأطفال اليوم سيتعرضون للموجات لعقود أطول من الأجيال السابقة.
- نمو متسارع: الخلايا سريعة الانقسام قد تكون أكثر عرضة لأي تأثيرات محتملة.

5.12- شبكات الجيل الخامس (5G) والمخاوف الخاصة

أثارت G 5 مخاوف جديدة بسبب:

- الترددات الأعلى: الموجات المليمترية (24-100 جيجاهرتز) لم تُستخدم على نطاق واسع من قبل.
- كثافة المحطات: شبكات G 5 تتطلب محطات صغيرة كثيرة (small cells) بسبب المدى القصير.
- التحليل الفيزيائي:

- الموجات المليمترية تُمتص في الجلد ولا تخترق عميقاً، مما يقلل التعرض للأعضاء الداخلية.
- الطاقة الكلية المنبعثة من المحطات الصغيرة أقل بكثير من أبراج G 4 التقليدية.
- التعرض الفعلي قد يكون أقل من الأجيال السابقة بسبب الاتصال الأكثر كفاءة.
- الدراسات حتى الآن: محدودة جداً، لكن المحاكاة الفيزيائية تشير إلى أن التعرض سيبقى ضمن الحدود الآمنة.

6.12- التوصيات الوقائية (مبدأ الحيطة)

رغم عدم وجود دليل قاطع على الضرر، تنصح بعض المنظمات الصحية بتطبيق مبدأ الحيطة (Precautionary Principle):

للأفراد:

- استخدام سماعات الأذن أو مكبر الصوت لإبعاد الهاتف عن الرأس.
- تقليل مدة وتكرار المكالمات، خاصة عند الإشارة الضعيفة (يزيد الهاتف قدرته).
- عدم حمل الهاتف في الجيب مباشرة على الجسم لفترات طويلة.
- إبعاد الهاتف عن الرأس أثناء النوم.
- تقليل استخدام الأطفال للهواتف.

معايير التصميم:

- جعل الأجهزة تعمل بأقل قدرة ممكنة.

- تحسين الكفاءة لتقليل زمن الإرسال.
- توجيه الإشارة بدقة (beamforming) لتقليل التعرض غير الضروري.

7.12- قياس مستويات الإشعاع

يمكن قياس شدة المجال الكهرومغناطيسي باستخدام:

مقاييس المجال: (Field Meters) تقيس شدة المجال الكهربائي (V/m) والمغناطيسي (A/m)

المستويات النموذجية:

- بجانب محطة بث: 1-10 فولت/متر.
- في المنزل بعيداً عن المحطات: 0.1-1 فولت/متر.
- بجانب هاتف نشط: 10-100 فولت/متر (لكن على مسافة قصيرة جداً).
- للمقارنة: الحد الآمن الدولي عند 900 ميغاهرتز هو 41 فولت/متر.

8.12- التأثيرات النفسية والاجتماعية

بعيداً عن التأثيرات الفيزيائية المباشرة، هناك تأثيرات غير مباشرة مؤكدة:

- اضطرابات النوم: استخدام الهواتف قبل النوم يثبط إفراز الميلاتونين بسبب الضوء الأزرق (ليس الموجات الراديوية).
- الإدمان والقلق: الاستخدام المفرط يسبب مشاكل نفسية واجتماعية.
- قلة النشاط البدني: الجلوس الطويل مع الأجهزة.
- حوادث المرور: الانشغال بالهاتف أثناء القيادة.

9.12- الخلاصة العلمية المتوازنة

ما نعرفه بيقين:

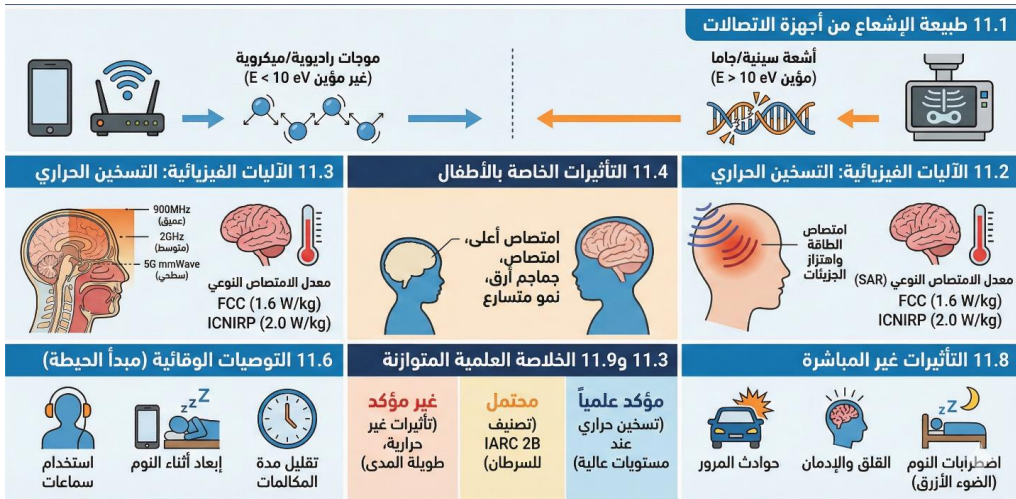
- الإشعاع من الهواتف والمحطات هو غير مؤين ولا يُتلف DNA مباشرة.
- التأثير الفيزيائي الوحيد المؤكد هو التسخين الحراري عند مستويات عالية.
- جميع الأجهزة المعتمدة تعمل أقل بكثير من مستويات التسخين الضارة.
- لا دليل علمي قوي على أضرار صحية خطيرة حتى الآن.

ما لا نعرفه بيقين:

- التأثيرات طويلة المدى (30-40 سنة) لا تزال قيد الدراسة.
- التأثيرات غير الحرارية المحتملة تحتاج مزيد من البحث.
- التأثير على الأطفال والأجنة يحتاج دراسات أطول.

الموقف المتوازن:

استخدام التكنولوجيا بشكل معقول مع تطبيق احتياطات بسيطة، ومتابعة الأبحاث العلمية الجديدة.



13- الخلاصة

رحلتنا عبر فيزياء الاتصالات تكشف عن حقيقة أساسية: كل ابتكار في هذا المجال يعتمد على فهم عميق للمبادئ الفيزيائية. من معادلات ماكسويل التي توحد الكهرباء والمغناطيسية والضوء، إلى ميكانيكا الكم التي تعد بأمان مطلق، الفيزياء هي الأساس الذي بُنيت عليه ثورة الاتصالات.

شهدنا كيف أن الموجات الكهرومغناطيسية التي اكتشفها هيرتز في المختبر أصبحت العمود الفقري للراديو والتلفزيون والهواتف المحمولة. رأينا كيف أن فهم انتشار الضوء في الألياف البصرية مكّن من نقل تيرابايتات من البيانات عبر المحيطات. وتعلمنا كيف أن الفيزياء الكمومية، التي كانت ذات يوم نظرية مجردة، تعد الآن بتحويل كامل للأمن السيبراني والحوسبة.

التوازن بين الفوائد والمخاطر

لكن هذا التقدم المذهل يأتي مع مسؤولية علمية واجتماعية. تناولنا في هذه المقالة التأثيرات الصحية المحتملة للإشعاع الكهرومغناطيسي، وخلصنا إلى أن الأدلة العلمية الحالية، رغم طمأننتها بشكل عام، لا تستبعد نهائياً بعض المخاطر طويلة المدى. هذا يتطلب منا:

- الاستمرار في البحث العلمي الصارم: لفهم التأثيرات طويلة المدى، خاصة على الفئات الحساسة كالأطفال.
- تطبيق مبدأ الحيطة: اتخاذ احتياطات معقولة دون الوقوع في الذعر غير المبرر.
- تحسين التصميم التكنولوجي: تطوير أجهزة وشبكات أكثر كفاءة تقلل التعرض غير الضروري.
- التوعية العلمية: نشر معلومات دقيقة ومتوازنة بعيداً عن المبالغات في كلا الاتجاهين.

التحديات المستقبلية

التحديات أمامنا ضخمة ومتعددة الأبعاد:

- تقنياً: كيف نواصل زيادة سعة الاتصالات مع الاقتراب من الحدود الفيزيائية الأساسية؟ كيف نضمن الأمان في عصر الحواسيب الكمومية؟
- اجتماعياً: كيف نوفر اتصالاً شاملاً لكل إنسان على الكوكب، مع تقليص الفجوة الرقمية بين الدول المتقدمة والنامية؟
- بيئياً: كيف نحقق التوسع في شبكات الاتصالات مع الحفاظ على البيئة وتقليل استهلاك الطاقة؟ مراكز البيانات والشبكات العالمية تستهلك الآن حوالي 2% من الكهرباء العالمية.
- صحياً: كيف نستفيد من التكنولوجيا دون التعرض لمخاطر صحية محتملة، مباشرة أو غير مباشرة (كالإدمان والعزلة الاجتماعية)؟

الطريق إلى الأمام

الإجابات ستأتي من فهم أعمق للفيزياء وابتكارات جديدة متعددة التخصصات. الباحثون يستكشفون:

- مواد جديدة: مثل الجرافين والمواد ثنائية الأبعاد التي قد تحدث ثورة في الإلكترونيات والفوتونيات.
- ظواهر فيزيائية جديدة: مثل الميتاماتيريال (metamaterials) التي يمكنها التحكم في الموجات الكهرومغناطيسية بطرق غير تقليدية، والفوتونيات الطوبولوجية التي توفر قنوات اتصال محمية من الاضطرابات.

- أنماط حوسبة جديدة: مثل الحوسبة الكمومية التي قد تحل مسائل مستعصية، والحوسبة العصبية الشكلية (neuromorphic computing) المستوحاة من الدماغ البشري.
- تقنيات طاقة مستدامة: لتشغيل البنية التحتية للاتصالات بطاقة نظيفة ومتجددة.
- تصاميم صحية أكثر: أجهزة تعمل بقدرة أقل، وشبكات ذكية تقلل التعرض، ومعايير أمان محدثة باستمرار بناءً على أحدث الأبحاث.

الرؤية الشاملة

ما هو مؤكد هو أن الفيزياء ستظل في قلب كل تقدم في تكنولوجيا الاتصالات، تماماً كما كانت على مدى القرن الماضي. من التلغراف إلى 5G وما بعده، من الأسلاك النحاسية إلى الألياف البصرية والاتصالات الكمومية، من الصمامات المفرغة إلى الحواسيب الكمومية، الفيزياء هي القوة الدافعة التي حولت عالمنا إلى قرية عالمية متصلة.

لكن مع هذه القوة تأتي المسؤولية. علينا أن نتذكر دائماً أن التكنولوجيا وسيلة وليست غاية. الهدف النهائي ليس فقط سرعات أعلى ونطاقات أوسع، بل تحسين حياة البشر، وتعزيز التواصل الإنساني الحقيقي، وبناء مستقبل مستدام وصحي للأجيال القادمة.

إن فهم الفيزياء وراء تكنولوجيا الاتصالات ليس مجرد تمرين أكاديمي، بل هو ضرورة لاتخاذ قرارات مستنيرة - كأفراد نستخدم هذه التكنولوجيا يومياً، وكمجتمع يشكل مستقبله الرقمي. بالمعرفة العلمية الدقيقة، يمكننا الاستمتاع بفوائد هذه الثورة التكنولوجية مع تقليل مخاطرها المحتملة، محققين توازناً حكيماً بين التقدم والحذر، بين الابتكار والمسؤولية.

المستقبل مشرق وملء بالإمكانيات، والفيزياء - كما كانت دائماً - ستكون البوصلة التي ترشدنا في هذه الرحلة الاستثنائية نحو عالم أكثر اتصالاً، وعلماً، وربما، حكمة.

14- المراجع (References)

1. Maxwell, J. C. (1865). "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field". Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 155, 459-512.

2. Hertz, H. (1893). *Electric Waves: Being Researches on the Propagation of Electric Action with Finite Velocity Through Space*. London: Macmillan.
3. Shannon, C. E. (1948). "A Mathematical Theory of Communication". *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423.
4. Kao, K. C., & Hockham, G. A. (1966). "Dielectric-fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies". *Proceedings of the IEE*, 113(7), 1151-1158.
5. Bardeen, J., & Brattain, W. H. (1948). "The Transistor, A Semi-Conductor Triode". *Physical Review*, 74(2), 230-231.
6. Bennett, C. H., & Brassard, G. (1984). "Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing". *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, 175-179.
7. Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
8. Agrawal, G. P. (2010). *Fiber-Optic Communication Systems* (4th ed.). Wiley.
9. Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice* (2nd ed.). Prentice Hall.
10. Saleh, B. E., & Teich, M. C. (2019). *Fundamentals of Photonics* (3rd ed.). Wiley.
11. Sklar, B. (2001). *Digital Communications: Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Prentice Hall.
12. Gisin, N., Ribordy, G., Tittel, W., & Zbinden, H. (2002). "Quantum Cryptography". *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 145-195.

13. Andrews, J. G., et al. (2014). "What Will 5G Be?". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32(6), 1065-1082.
14. Cisco Annual Internet Report (2020). Cisco Systems.
15. ITU-T Recommendations on Optical Fiber Communication (2021). International Telecommunication Union.