الاتصالات اللاسلكية المستخدمة في وسائط النقل

الدكتور المهندس مازن محمود عبد اللطيف*

*دكتوراه في هندسة الاتصالات –جامعة حلب.

*رئيس شعبة اللاسلكي والمقاسم المركزية، مديرية الإشارات والاتصالات، المؤسسة العامة للخطوط الحديدية السورية.

*محاضر في قسم هندسة الاتصالات، كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية، جامعة حلب.

*محاضر في المعهد التقاني للخطوط الحديدية.

ملخص

لا شك أن لأنظمة الاتصالات اللاسلكية دور هام حول العالم في منظومة النقل بمختلف أنواعها البرية والبحرية والجوية، حيث تعد ركيزة أساسية من أساسيات التواصل من أجل تحقيق متطلبات العمل من جهة، والحفاظ على أمن وسلامة المسافرين من جهة أخرى. تلعب الاتصالات اللاسلكية دوراً حيوياً في عملية الأمن وذلك من خلال تسهيل نقل المعلومات ومراقبة التحركات والتحذير من تدهور أحد المواقف أو التعامل مع أي أزمة قد تنشأ. إن أهم ما يميز هذه المنظومة هي الوثوقية العالية، وسهولة استخدامها، وبساطة تجهيزاتها إضافة إلى التغطية الجغرافية الواسعة.

كلمات مفتاحية: **UHF,VHF, Mobile Station, Base Station, Handset**

١-مقدمة:

تعدُّ أنظمة الاتصالات اللاسلكية من النظم المهمة في حياتنا اليومية نظراً لما تتمتع به من مرونة ووثوقية واعتمادية عالية، بالإضافة إلى رخص تكلفة الأجهزة العاملة ضمن هذه المجالات وتأديتها لتطبيقات ممتازة جداً في تحقيق التواصل اللاسلكي وخصوصاً في منظومات الطيران والسكك الحديدية والملاحة البحرية إضافة إلى منظومة الإطفاء والشرطة، حيث تعمل هذه الأنظمة إما على التردد العالي جداً **(VHF)**

Very High Frequency أوتعمل على التردد فائق التردد Ultra High Frequency (**UHF**).

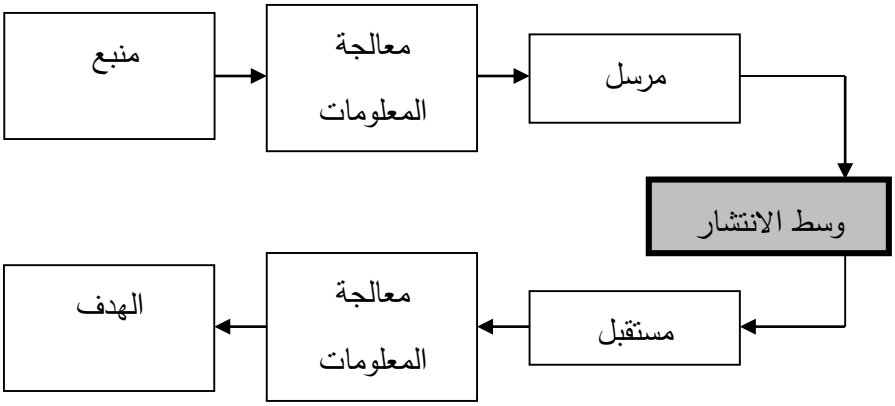
الشكل (١) استخدام الاتصالات اللاسكية في السكك الحديدية

٢-منظومة الاتصالات اللاسلكية:

تطورت أنظمة الاتصال اللاسلكي بشكل هائل خلال السنوات والعقود الأخيرة، نظراً لأهميتها الكبرى واستخدامها الواسع، كما تم تطوير هذه الأنظمة بغية تحسين أدائها، حيث تم استبدال الصمامات المفرغة بالترانزستورات والدارات التكاملية، كما تم الانتقال إلى الأنظمة الرقمية، ودخلت معالجة الإشارة الرقمية والمتكيفة إلى أجهزة الاستقبال المكون الأساسي لأنظمة الاتصال اللاسلكي.

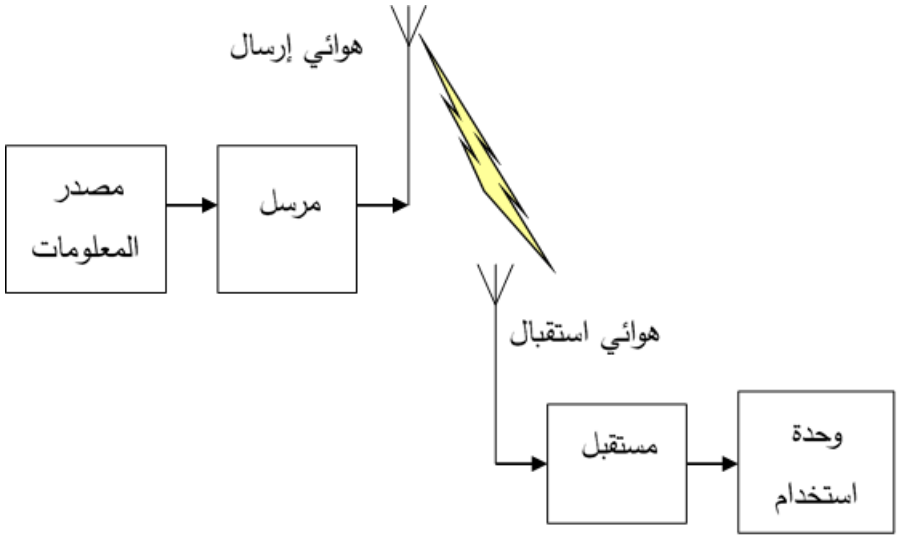
يوضح الشكل (٢) مخطط صندوقي مبسط لنظام اتصال عام، يسمح هذا النظام بنقل المعلومات من المنبع Source إلى الهدف Destination.

يمكن أن يكون وسط الانتشار في هذا النظام هو الانتشار اللاسلكي كبديل للكابلات المحورية والأسلاك الكهربائية والألياف الضوئية وغيرها، حيث إن استخدام هذه البدائل غير ملائم تقنياً وغير اقتصادي وخاصة في الإرسال للمسافات البعيدة.



الشكل (٢) المخطط الصندوقي المبسط لنظام اتصال.

يتكون نظام الاتصال اللاسلكي من منبع معلومات ومعالج للمعلومات (محول ومكيف للإشارة)، ومن ثم المرسل فمحول للإشارة الكهربائية إلى أمواج كهرطيسية (هوائي) ثم وسط الانتشار. في الجهة الأخرى لدينا محول (مجمع) طاقة حيث يقوم بتحويل طاقة الأمواج الكهرطيسية الواصلة إلى الهوائي إلى إشارة كهربائية يمكن التعامل معها، ومن ثم لدينا المستقبل فمعالج المعلومات ثم أجهزة خرج المستقبل (وحدة استخدام المعلومات). يمكن استبدال المخطط الصندوقي السابق بمخطط مبسط، كما هو موضح في الشكل (٣)، حيث يقوم الهوائي بتحويل الإشارة الكهربائية إلى أمواج كهرطيسية وبالعكس، وآلية انتشار الأمواج الكهرطيسية تعتمد على نظرية الحقل الكهرطيسي كما يشكل وسط الانتشار منبع الضجيج الخارجي.

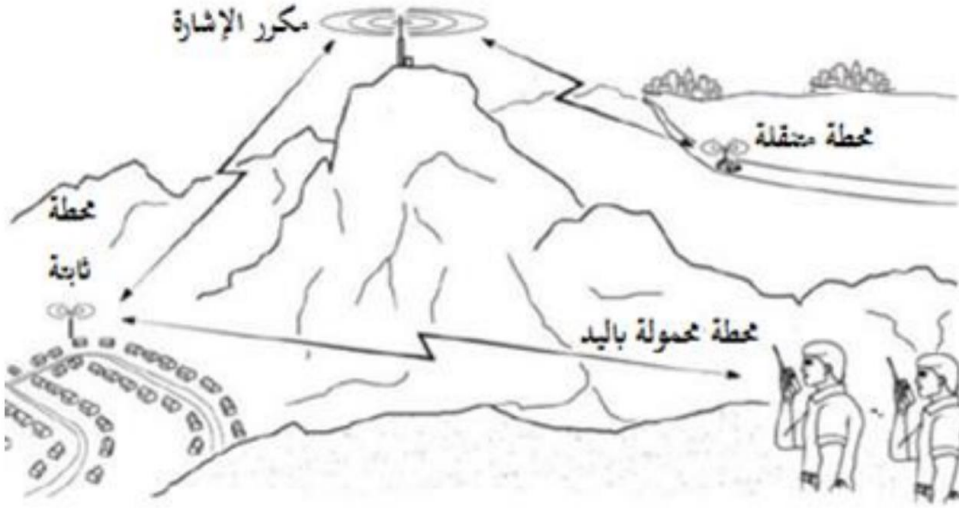


الشكل (٣) مخطط بسيط لنظام اتصال اللاسلكي.

٣-مكونات نظام اللاسلكي:

يتألف نظام الراديو اللاسلكي من المكونات التالية:

١. أجهزة محمولة باليد أو (Handset or Handheld).
٢. أجهزة مثبتة في مركبة Station Mobile
٣. أجهزة ثابتة Station Base
٤. مكررات الإشارة Repeaters
٥. الكابلات.



الشكل (٤) صورة توضح استخدام نظام اللاسلكي.

٣-١- أجهزة محمولة باليد: Handset or Handheld

تعمل معظم أجهزة اللاسلكي المحمولة على النطاق بين MHZ (136-147) وتتميز أجهزة اللاسلكي المحمول بخفة الوزن، كما تحتوي على بطارية من الليثيوم سريع الشحن والذي يُبقِي الجهاز في حالة عمل لمدة يومين أو ثلاثة أيام حسب الاستخدام.

الشكل (٥): صورة لجهاز المحمول باليد.

أمَّا ما يخص الاستطاعة الصادرة من هذا الجهاز فهي صغيرة لا تتجاوز 5W، وبالتالي يستحسن وجود خط نظر في حال التواصل مع محطة ثابتة أو متنقلة وذلك لضمان جودة الإشارة، كما أنها تتميز بهوائي صغير غالباً ما يكون بطول ربع طول الموجة أو أقل كما هو موضح في الشكل (٦)

الشكل (٦) أنواع مختلفة للجهاز المحمول باليد.

يمكن برمجة هذه الأجهزة على عدة قنوات ضمن نطاق ترددي، إذ يوجد ميزة مهمة جداً فيها وهي البحث؛ حيث يمكن لهذا الجهاز استقبال عدة إشارات ضمن المجال الترددي العامل والاستجابة لهم، كما تقوم بعض الشركات بدمج شاشة LCD مع الجهاز لسهولة الاستعراض والتبديل بين القنوات والبرمجة وغيرها.

هناك عدة الشركات تقوم بتصنيع هذه الأجهزة ومن بينها: ICOM و KENWOOD.

الشكل (٧) جهاز محمول باليد نوع ICOM

٣-٢- أجهزة مثبتة في المركبات المتحركة:Mobile Station

تتميز أجهزة الراديو اللاسلكي المثبتة في المركبات بأنها ذات استطاعة أعلى من المحطات المحمولة باليد، إذ تتراوح استطاعتها مابين ٢٥ واط إلى ٥٠ واط وبالتالي على الأقل خمسة أضعاف استطاعة المحمولة باليد، وبالتالي مدى أكبر في استقبال التغطية اللاسلكية وبحال الإرسال أيضاً.

تتميز هذه التجهيزات باحتوائها على ميكرفون، ومكبر صوت خارجي منفصل، وأداء ممتاز، وتركب ضمن المركبة وتوصل مباشرة مع بطارية المركبة، إذ أن جهد تغذيتها يكون ١٢ فولتاً، وبالتالي من الممكن الوصل مباشر مع بطارية المركبة مع تفضيل وجود فاصمة منصهرة للحماية من عكس القطبية أو التيارات العالية. يوضح الشكل (٨) أحد الأجهزة التي يتم تثبيتها في مركبة حيث يتم تزويده بالطاقة عبر الوصل مع مدخرة المركبة ويتم تركيب هوائي على سطحها لتحقيق أفضل إرسال واستقبال ممكن.

الشكل (٨): جهاز مثبت في المركبات.

يتم وصل الهوائي بالجهاز اللاسلكي عبر كبل Coaxial رفيع نوعاً ما كي يتلائم مع مكونات المركبة وغالباً مايتم استخدام النوع RG58 وهو عبارة عن كبل محوري يقوم بنقل الأمواج الراديوية من الجهاز للهوائي وبالعكس.

٣-٣- أجهزة ثابتة Base station

تعدُّ المحطات الثابتة مشابهة بشكل كبير للأجهزة المركبة على المركبات المتحركة حيث تتميز بنفس خصائص الإرسال ولكن تختلف بنوع الهوائيات. تتسم هذه الهوائيات بربحٍ عالٍ وأداءٍ مميز، مقارنة بهوئيات المركبة على المركبات المتحركة، إذ أنه من الممكن تركيب هوائي ذي طول مناسبٍ وعالٍ على سطح سيارة بالنسبة للمحطات المتحركة، لذلك يكون أداء المحطات الثابتة أفضل بسبب وجود هوائي أنسب، مناسب لتردد الارسال.

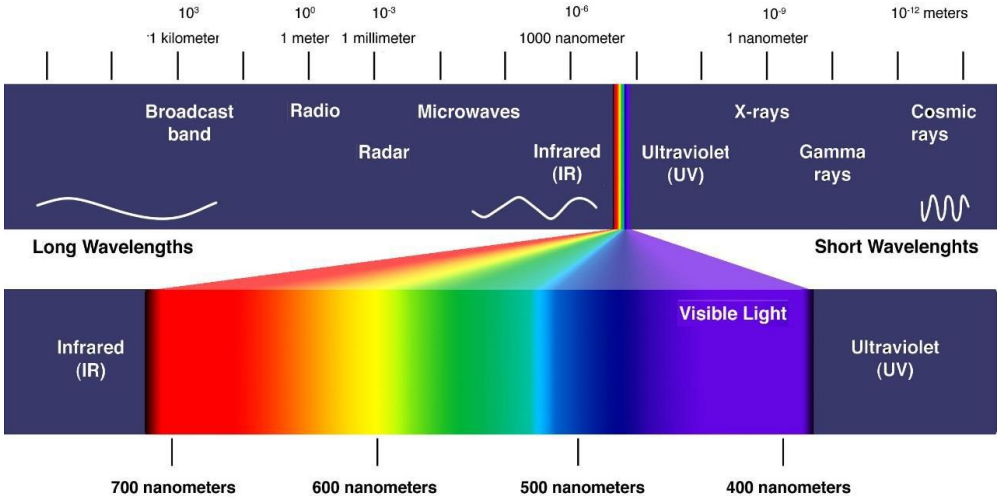
٤-الترددات التي تعمل عليها أجهزة اللاسلكي:

٤-١- الأمواج ذات الترددات العالية جداً VHF:

تقع الأمواج ذات التردد العالي جداً VHF ضمن المجال MHz (30-300) وتتميز بأنها تتبع لمدى خط النظر LOS حيث تمتص السماء هذه الترددات، وبالتالي لدينا أمواج أرضية فقط، ولذا دعيت الأنظمة العاملة على هذا النطاق بأنظمة الاتصالات اللاسلكية الأرضية Land Mobile، حيث تغطي هذه الأمواج مساحة جغرافية قد تصل إلى 100 كيلومتر ويتم استخدامها على نطاق واسع في البث الإذاعي FM Broadcasting وتطبيق شبكات راديوية خاصة بمنظومات مجتمعية كالإسعاف والإطفاء وغيرها، لكونها تتميز بدقة الصوت مع تغطية مسافة مقبولة للمدن والأرياف.

٤-٢- الأمواج فائقة التردد UHF :

تقع الأمواج ذات التردد العالي جداً VHF ضمن المجال MHz (3000-300) وتتميز بطول موجي صغرى جداً، وبالتالي الأجهزة العاملة على هذا النطاق تتميز بطول هوائي صغرى وقد يكون مدمجاً في بعض الأحيان. يتميز هذا النوع من الأنظمة العاملة على هذه الترددات بدقة صوت ممتازة ولكن بتغطية منطقة جغرافية صغيرة نوعاً ما، حيث تتأثر هذه الأمواج بالضياعات والتشويش وضياع المسار أو ما يسمى Path Loss، وهذا ما يؤثر على انتشارها وامتدادها لتغطية مسافات أقرب، ومن الممكن زيادة التغطية بتنصيب محطات تقوية مسافة كل /١٥/ كم وربط هذه المحطات مع ببعضها.

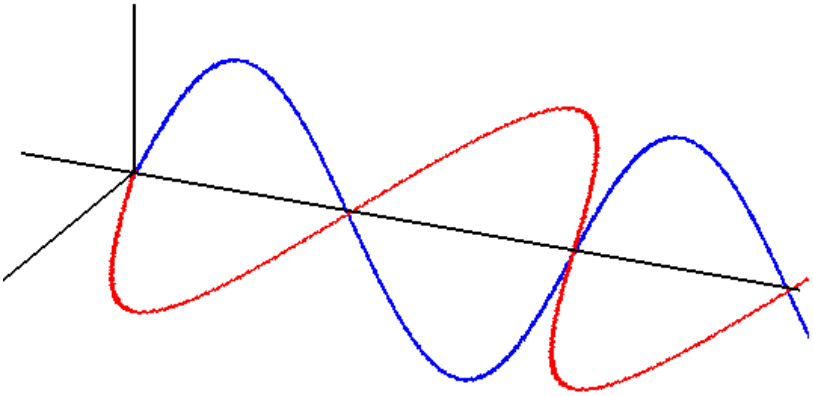


الشكل (٩) الطيف الترددي

٥-الإشعاع الكهرطيسي (Electromagnetic Radiation):

عند تطبيق استطاعة كهربائية على دارة، تسري تيارات في فروع الدارة وتنشأ جهود عند نقاط الدارة المختلفة، وبحسب خواص هذه الدارة يكون هناك علاقة ما بين الجهود والتيارات، فعلى سبيل المثال ستكون قيم الجهود والتيارات متعلقة بقيم الممانعة للدارة، والعلاقة الطورية بينها ترتبط ببنية هذه الدارة، وبشكل مشابه فإن أي استطاعة تنفذ إلى الفراغ فإنها ترتبط بمواصفات هذا الفراغ، وفي حال نفوذ هذه الاستطاعة إلى الفراغ نستطيع القول إن هذه الاستطاعة قد تم إشعاعها وبالتالي فإنها ستنتشر في الفراغ على شكل يعرف بالأمواج الكهرطيسية.

إن نظرية الإشعاع الكهرطيسي تم إيجادها من قبل العالم البريطاني ماكسويل عام ١٨٥٧ الذي وضع الأسس الرياضية التي تشرح آلية انتشار الأمواج الكهرطيسية، وتنتشر الأمواج الكهرطيسية في الفراغ بسرعة تساوي سرعة الضوء، وتتكون من مركبي الحقل الكهربائي والمغناطيسي المتعامدتين، وتنتشر باتجاه يتعامد أيضاً مع السطح المتشكل عن هاتين المركبتين كما هو مبين في الشكل (١٠).



الشكل (١٠): انتشار الحقل الكهرطيسي.

إن شدة الحقلين الكهربائي والمغناطيسي للأمواج الكهرطيسية مهمة وهي تقابل الجهد والتيار في الدوائر الكهربائية وتقاس بالـ (فولت/متر) و (أمبير/متر) ويرتبطان بالعلاقة:

$$E = Z \cdot H \qquad (١)$$

حيث : E هي شدة الحقل الكهربائي (V/m).

H هي شدة الحقل المغناطيسي (A/m).

Z هي الممانعة المميزة للوسط (Ω) وتعطى بالعلاقة: $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$

حيث μ النفاذية المغناطيسية للوسط.

ε السماحية الكهربائية.

وتكون قيمهما بالنسبة للفراغ الحر:

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} \quad H/m$$

$$\varepsilon_o = \frac{1}{36\pi \times 10^9} = 8.854 \times 10^{-12} \quad F/m$$

وبالتالي فإن قيمة الممانعة المميزة للفراغ الحر تكون:

$$Z = 120\ \pi = 377\ \Omega$$

تشع الأمواج الكهرطيسية من خلال الهوائيات كما أن نسبة الاستطاعة التي يتم إشعاعها ترتبط بالنسبة بين طول الهوائي إلى طول الموجة. كما أن مفهوم الاستقطاب للموجة Polarization يعدُّ مهماً جداً من أجل الاستقبال الأمثل للأمواج، والاستقطاب يطلق على التوجيه الفيزيائي للأمواج في الفراغ، ويرتبط باتجاه مركبة الحقل الكهربائي، ويمكن أن نميز هنا أنواعاً مختلفة من الاستقطاب: (الأفقي، العمودي، الدائري، الإهليلجي)، ويتعلق ذلك أيضاً بشكل الهوائي.

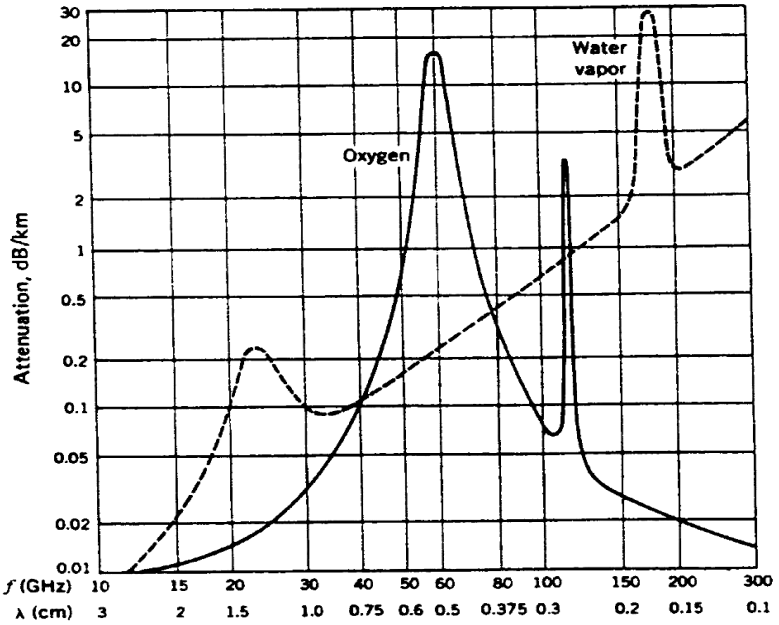
في طرف الاستقبال يتم التقاط الموجة الكهرطيسية من خلال هوائي الاستقبال والذي يكون مماثلاً بمواصفاته لهوائي الإرسال. تنخفض شدة الحقل للأمواج الكهرطيسية بشكل سريع مع الابتعاد عن هوائي الإرسال، وهذا ما يعبر عنه بالتضعيف للأمواج الكهرطيسية، ويقاس التضعيف بالديسيبل.

من أجل نقطتين تبعدان r_1 و r_2 عن المنبع حيث $r_1 < r_2$ يكون:

$$\alpha = 20 . \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \qquad (٢)$$

وبالتالي فعند مسافة 2r من منبع الأمواج فإن شدة الحقل تكون أقل بـ 6 dB عن قيمتها على بعد r عن المنبع. في الفراغ الحر لا يتم امتصاص الأمواج الكهرطيسية لعدم وجود شيء يسهم بذلك، على العكس منه في الغلاف الجوي حيث يميل إلى امتصاص بعض الأمواج الراديوية، كون بعض طاقة الأمواج الكهرطيسية تنتقل إلى

ذرات وجزيئات الغلاف الجوي، ولحسن الحظ فإن الامتصاص للغلاف الجوي للأمواج الكهرطيسية ذات الترددات التي هي أدنى من 10 GHz يكون مهملاً، كما هو موضح في الشكل (11) فإن الامتصاص من خلال الأوكسجين وبخار الماء في الغلاف الجوي يبدأ بالازدياد اعتباراً من هذه القيمة للتردد ويزداد بشكل متدرج، ويكون هناك بعض القيم العالية للتضعيف عند بعض الترددات بسبب الطنين (Resonant)، ويجب تجنب هذه القيم للترددات في أنظمة الاتصال الراديوية مثل 60 GHz و 120 GHz وكذلك 23 GHz و180 Hz. والجدير بالذكر أن ضياعات الامتصاص تزداد بزيادة الرطوبة أو الضباب أو الأمطار والثلوج، كما يمكن أن يحدث انعكاسات من خلال حبيبات المطر والثلج إضافة إلى ضياعات الامتصاص، فعلى سبيل المثال في أنظمة الرادار التي تعمل عند تردد 10 GHz يصل المدى للكشف إلى /٧٥/ كم في الهواء الجاف وقد ينخفض إلى /٨/ كم في حالة المطر الغزير.



الشكل (١١): علاقة تخميد الإشارة مع التردد.

٦- طرق انتشار الأمواج الكهرطيسية:

يعتمد انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية التي تستخدم طبقات الجو المختلفة لانتشارها على قيمة تردد الارسال. تنتشر الأمواج الكهرطيسية عموماً وفق ثلاثة أنماط أساسية:

١) الأمواج الأرضية Ground waves.

٢) الأمواج الجوية Sky waves.
٣) الأمواج الفراغية (خط النظر) Space waves.

٦-١- الأمـواج الأرضيـة:

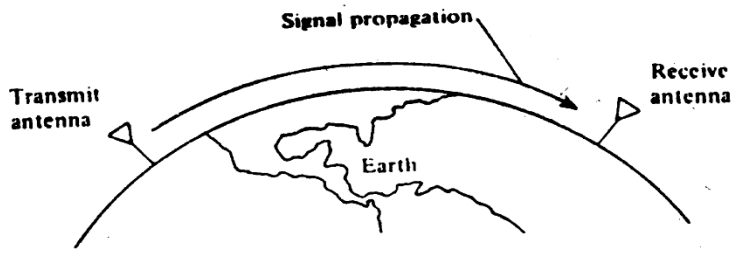
تنتشر هذه الأمواج بمحاذاة سطح الأرض، ويكون استقطابها عمودياً لمنع قصر مركبة الحقل الكهربائي إلى الأرض. مع انتشار الموجة فوق سطح الأرض كما هو موضح في الشكل (١٢) **a**، فإنها تميل أكثر فأكثر ومع زيادة الميل يتم قصر مركبة الحقل الكهربائي إلى الأرض وتنخفض شدة الحقل، وبالتالي فعند مسافات معينة (بحسب طبيعة الأرض) فإن الموجة تتلاشى.

إن المسافة العظمى للانتشار تتعلق بتردد الموجة وبالاستطاعة لمحطة الإرسال. إن شدة الحقل عند مسافة (d) من هوائي الإرسال تعطى بالعلاقة:

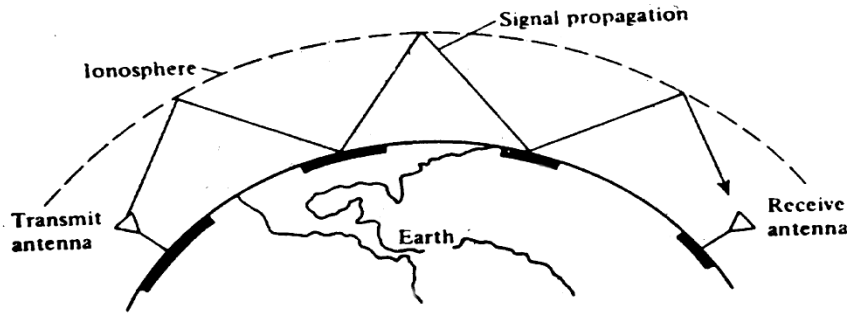
$$E = \frac{120\ \pi . h_t . I}{\lambda . d} \qquad (٣)$$

بتوضع هوائي الاستقبال عند هذه النقطة فإن الإشارة المستقبلة مقدرة بالفولت ستكون:

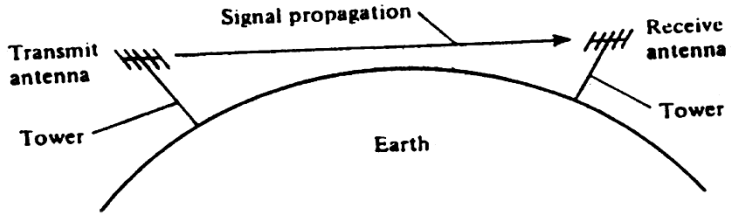
$$V = \frac{120\ \pi\ h_t . h_r . I}{\lambda . d} \qquad (٤)$$



(a) Ground-Wave Propagation (Below 2 MHz)



(b) Sky-Wave Propagation (2 to 30 MHz)



(c) Line-of-Sight (LOS) Propagation (Above 30 MHz)

الشكل (١٢): انتشار الأمواج الأرضية.

حيث إن:

$120\ \pi$: الممانعة المميزة للفراغ الحر.

h_t: الارتفاع الفعال لهوائي الإرسال.

h_r: الارتفاع الفعال لهوائي الاستقبال.

I: تيـار الهوائـي.

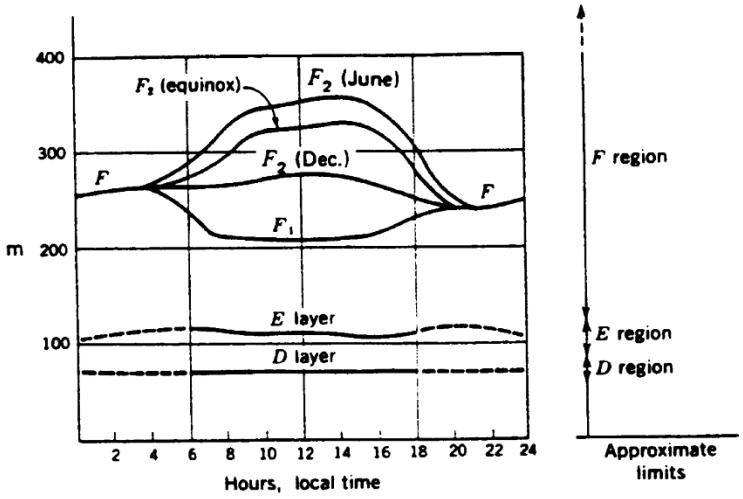
d: المسـافة بين هوائـي الإرسـال والاستقبـال.

λ: طـول الموجـة.

وفي الواقع قد تقل قيمة الجهد المستقبل عن هذه القيمة بسبب ضياعات الامتصاص للغلاف الجوي الملاصق لسطح الأرض.

٦-٢- الأمـواج السماوية:

وجـد العالـم Edward Appleton أن التأيّن للأجزاء العليـا من الغلاف الجوي يلعب دوراً في انتشار الأمواج الراديـوية، فالغلاف الجوي يستقبل طاقة كافية من الشمس تؤدي إلى تأيّن الجزيئات إلى أيونات موجبة وسالبة وتبقى هذه الأيونات لفترة طويلة من الزمن. تنتشر الأمواج السماوية كما هو موضح في الشكل (١٢)، على شكل انعكاس من طبقات الجو باتجاه سطح الأرض وذلك بشكل متكرر، وطبيعة الإنعكاس مرتبطة بطبيعة الغلاف الجوي، حيث وجد أن هناك عدة طبقات متأيّنة على إرتفاعات مختلفة تختلف عن بعضها بكثافة الذرات المتأينة وقد أطلق على هذه الطبقات تسميات: D، E، F_1، و F_2 كما هو موضح في الشكل (١٣).



الشكل (١٣): طبقات الغلاف الجوي.

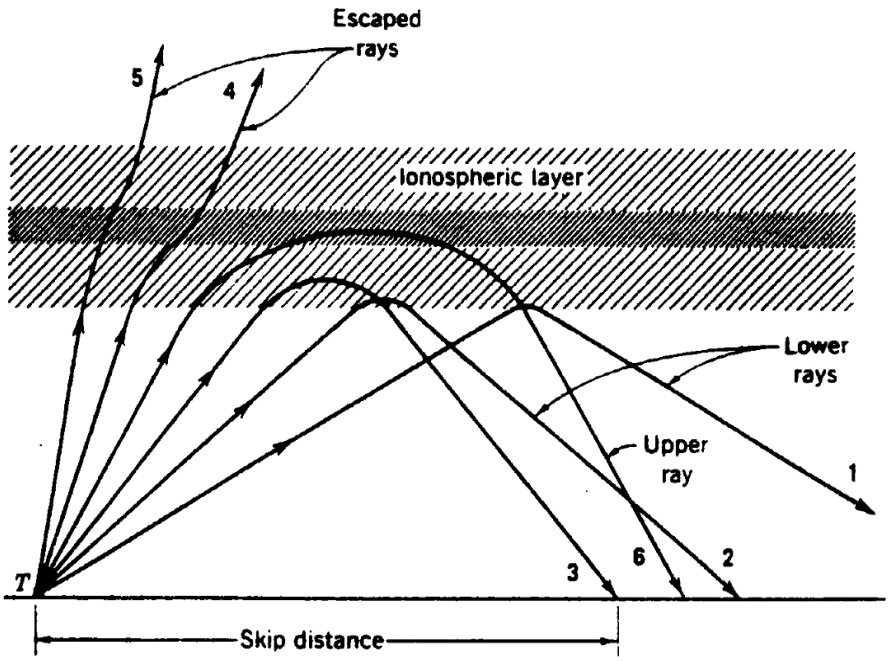
الطبقة D: هي الطبقة الأكثر قرباً من الأرض وتتوضع على ارتفاع متوسط من **(70Km)** وسماكة **(10Km)**، ودرجة تأينها تتعلق بإرتفاع الشمس فوق الأفق.، ولهذا فإنها تختفي في الليل، وهي الأقل أهمية من وجهة نظر انتشار الأمواج وهي تعكس بعض الأمواج LF و**VLF** وتمتص الأمواج MF و**HF** إلى حد ما.

الطبقة E: وتلي الطبقة D في بعدها عن سطح الأرض وتتوضع على ارتفاع (100Km) وسماكة (25Km)، وبشكل مشابه للطبقة **D** فإنها تختفي في الليل وسبب اختفائها يعود إلى عمليات إعادة الاتحاد للأيونات إلى جزيئات وذلك عند غياب مصدر الطاقة (الشمس) في الليل.

الطبقة F_1: تتوضع هذه الطبقة على ارتفاع (180Km) من سطح الأرض في النهار وتندمج مع الطبقة F_2 في الليل ويكون سمكها في النهار حوالي (20Km). وعلى الرغم من أن بعض أمواج HF تنعكس عنها فإن أغلبها تعبرها لتنعكس عن الطبقة F_2.

وبالتالي فإن الأثر الأساسي للطبقة F_1 هو في الواقع امتصاص بعض الطاقة للأمواج HF.

الطبقة F_2: وهي الأبعد عن سطح الأرض وهي الأهم لانعكاس الأمواج الراديوية ذات الترددات المتوسطة والعالية، وتصل سماكتها حوالي (200Km) وارتفاعها عن سطح الأرض يتفاوت من (250Km) إلى (400Km) في النهار.، أما في الليل فإنها تهبط حتى حوالي (300Km) حتى تندمج مع الطبقة F_1. وتتميز بكثافة درجة التأيّن لذراتها، وتختلف درجة التأين باختلاف ساعة النهار ودرجة الحرارة والدورة الشمسية، ولا تختفي الطبقة F في الليل خلافاً للطبقات D و**E** كونها هي الأعلى والأكثر تأيّناً. إن الانعكاس عن هذه الطبقة يحدث نتيجة الإنكسارات العديدة المتدرجة للأشعة بسبب اختلاف تركيز الذرات المتأينة الذي يؤدي إلى اختلاف في قرينة الانكسار للوسط كما هو موضح في الشكل (١٤).



الشكل (١٤): انعكاس الأمواج عن طبقة الآيونوسفير.

يمكن بشكل عام أن نعرّف التردد الحرج (F_c) لطبقة ما:« بأنـه أعلى تردد سوف ينعكس عنها مرة أخرى إلى سطح الأرض»، ومن الضروري معرفة قيمته عند شروط معينة، كون قيمته تختلف باختلاف هذه الشروط. كما أنه يجب الانتباه إلى أنه قد يحدث انعكاس للأمواج المرتفعة عن سطح الأرض ثانية باتجاه طبقات الجو مما يساعد على انتشار هذه الأمواج لمسافات بعيدة.

٦-٣- الأمـواج المباشرة:

تنتشر هذه الأمواج وفق خطوط مستقيمة، وتحتاج إلى شروط خط النظر، لذلك فإن انتشارها يتحدد بتحدب الكرة الأرضية كما هو موضح في الشكل (١٢). كما أنها تنتشر في الفراغ ولكون أطوال موجاتها قصيرة جداً فإنها لا تنعكس من الطبقة

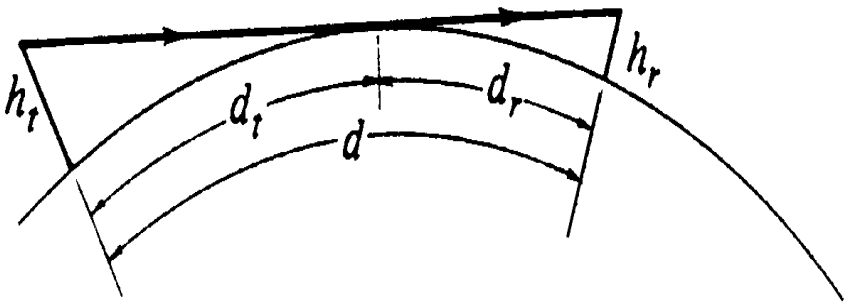
المتأيّنة. ويتحدد الأفق الراديوي لهوائي كما هو موضح في الشكل (١٥) وبتقريب جيد بالعلاقة التجريبية:

$$d_t = 4\sqrt{h_t} \qquad (٥)$$

حيث:

d_t: البعد عن هوائي الإرسال مقدراً بالـ Km.

h_t: ارتفاع هوائي الإرسال مقدراً بالـ m.



الشكل (١٥) الأفق الراديوي للأمواج الفراغية.

تستعمل العلاقة السابقة أيضاً لهوائي الإستقبال وبالتالي فإن المسافة الكلية بين هوائي الإرسال والاستقبال تحدد بالعلاقة التجريبية التالية:

$$d = d_t + d_r = 4\sqrt{h_t} + 4\sqrt{h_r} \qquad (٦)$$

٧- **الانتشار الراديوي والضجيج**: Radio Transmission and Noise

إن الأمواج الراديوية هي أمواج كهرطيسية ومن الممكن أن تتعرض للتخامد، والانعكاس، والانكسار، والتبعثر، والانعطاف بتغير بارامترات وسط الانتشار (حرارة، رطوبة، ضغط.....) وهو وسط غير متجانس، ويتم توصيف الخواص الكهربائية لهذا الوسط بقرينة الانكسار.

تتشكل عملياً الموجة الكهراطيسية من حقلين: الأول كهربائي، والثاني مغناطيسي، وهما متعامدان بشكل متبادل ويقعان في مستوى عمودي على منحني الانتشار، وتنتشر هذه الأمواج بسرعة $299793\ km/sec$ ويتم تقريب هذه القيمة إلى $3\times10^{5}\ Km/sec$ في معظم الحسابات. إن تدفق الاستطاعة من خلال سطح يعبر عنه $Watts/m^{2}$ وهذا حاصل ضرب شدة الحقل الكهربائي (فولت/متر) في شدة الحقل المغناطيسي (أمبير/متر) عند نقطة القياس على السطح. تنتشر الأمواج الكهرطيسية من المنبع بشكل كروي حيث إن استطاعة الموجة توزع على سطح كرة بنصف قطر **R** يوافق المسافة بين المرسل ونقطة القياس. إن كثافة الاستطاعة S في نقطة القياس من أجل استطاعة مرسلة P_t تعطى بالعلاقة التالية:

$$S=\frac{P_t.G_t}{4\pi.R^{2}} \qquad (7)$$

حيث إن G_t هو ربح هوائي الإرسال باتجاه نقطة القياس من أجل توزيع منتظم للاستطاعة على سطح الكرة. إن الاستطاعة المستقبلة من قبل هوائي المستقبل تكافئ

الكثافة مضروبة بالسطح الفعال لهوائي الاستقبال حيث إن السطح الفعال للهوائي يتعلق بربح الهوائي في اتجاه الاستقبال:

$$A_{er} = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \qquad (٨)$$

بضرب المعادلة (٤-٧) بالمعادلة (٤-٨) نحصل على الاستطاعة المستقبلة:

$$P_r = S \times A_{er} \Rightarrow P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{16 \pi^2 R^2} \qquad (٩)$$

وبالتالي:

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{16 \pi^2 R^2}{G_t G_r \lambda^2} \qquad (١٠)$$

ومعادلة موازنة الخط تعطى كما يلي:

$$L_B = 10 \log(\frac{P_t}{P_r}) = 20 \log(\frac{4\pi R}{\lambda}) - G_t - G_r \qquad (١١)$$

حيث إن G_t و G_r بالديسبل.

في حالة P_r أصغرية فهذا يوافق أعظم قيمة لمسافة الانتشار R_{max} حيث P_r استطاعة الإشارة المستقبلة و $P_{r\min}$ هي حساسية المستقبل. وبالتالي يمكن أن تكتب:

$$\frac{P_{r\min}}{P_t} = \frac{G_t G_r \lambda^2}{16 \pi^2 R_{\max}^2} \qquad (١٢)$$

العلاقة السابقة تعبر عن موازنة الخط (موازنة خط الاتصال من أجل قيمة أصغرية لاستطاعة الاستقبال التي هي حساسية المستقبل).

تجدر الإشارة هنا إلى أن خطوط الاتصالات الأرضية (الأمواج ذات الترددات المنخفضة والمنخفضة جداً) لا يمكن اعتبارها خطوط اتصال في الوسط الحر طبعاً بسبب وجود الأرض والطبقة القريبة منها (الأتموسفير).

في الواقع هناك ضياعات أخرى تحدث خلال عملية الانتشار حيث إن الضجيج المولد في الأتموسفير أو الفضاء أو الضجيج الصناعي يؤثر على الإشارة المستقبلة، والمستقبل بحد ذاته يشكل منبعاً للضجيج. لذلك من الضروري دائماً عند بناء وتصميم المستقبل أخذ هذا الضجيج بعين الاعتبار بالإضافة إلى مواصفات انتشار الأمواج وتأثيرها على أداء النظم الراديوية، وبناء جمل ودارات لحذف وتقليل الضجيج قدر الإمكان.

يمكن دراسة وتلخيص طبيعة تأثير الانتشار والضجيج في المجالات الراديوية بداية من المجال **VLF** وانتهاءً بالمجال **SHF** (مجال الترددات المنخفضة جداً وانتهاءً بمجال الترددات سوبر عالية). لكن قبل إجراء هذا التلخيص نستعرض التصنيف العام للطيف الترددي.

لقد تم الاتفاق بين جميع المنظمات والهيئات الدولية المعنية بشؤون الاتصالات على تقسيم المجال الترددي إلى مجالات فرعية بحيث يختص كل مجال فرعي بطريقة واحدة من طرق الانتشار وببعض أنواع التعديل المناسبة.

إن تصنيف الطيف الترددي الأكثر شيوعاً واستخداما هذه الأيام تم إنجازه من قبل معهد الهندسة الكهربائية والإلكترونية **IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)** كما هو موضح في الجدول (١).

جدول (١) الطيف الترددي وفق تصنيف IEEE.

المجال الترددي	التردد	طول الموجة
ELF (Extreme Low Frequency)	**30-300 Hz**	**10000-1000 km**
VF (Voice Frequency)	**300-3000 Hz**	**1000-100 km**
VLF (Very Low Frequency)	**3-30 kHz**	**100-10 km**
LF (Low Frequency)	**30-300 kHz**	**10-1 km**
MF (Medium Frequency)	**300-3000 kHz**	**1-0.1 km**
HF (High Frequency)	**3-30 MHz**	**100-10 m**

VHF (Very High Frequency)	**30-300 MHz**	**10-1 m**
UHF (Ultrahigh Frequency)	**300-3000MHz**	**100-10 cm**
SHF (Super High Frequency)	**3-30 GHz**	**10-1 cm**
EHF (Extreme High Frequency)	**30-300 GHz**	**1-0.1 cm**
Deci millimeter	**300-3000 GHz**	**1-0.1 mm**
P Band	**0.23-1 GHz**	**130-30 cm**
L Band	**1-2 GHz**	**30-15 cm**
S Band	**2-4 GHz**	**15-7.5 cm**
C Band	**4-8 GHz**	**7.5-3.75 cm**
X Band	**8-12.5 GHz**	**3.75-2.4 cm**
Ku Band	**12.5-18 GHz**	**2.4-1.67 cm**
K Band	**18-26.5 GHz**	**1.67-1.13 cm**
Ka Band	**26.5-40 GHz**	**1.13-0.75 cm**
Millimeter Wave	**40-300 GHz**	**7.5-1 mm**
Sub millimeter Wave	**300-3000 GHz**	**1-0.1 mm**

سنقوم باستعراض وتحليل للحزمة الترددية للإشارات الأساسية (المسموعة) وأهم الحزم الترددية المستخدمة في أنظمة الاتصال الراديوي المختلفة من حيث الاستخدام وطبيعة الانتشار وتأثير الضجيج على هذه الحزم المختلفة.

أ- المجال الترددي الواقع مابين: 20 Hz -20 KHz

هو المجال الترددي الكلي الذي يمكن لأذن الإنسان سماعها، ومع ذلك فهناك عدد قليل من الناس غير قادرين على سماع هذا المجال الكلي. إن الضجيج الصنعي (ضجيج المجتمعات الحديثة) مسؤول عن عدم تحسس آذاننا لهذا المجال الكلي من الترددات التي يمكن سماعها، والعمر يؤثر سلباً على أداء الأذن فمع تقدم الإنسان بالعمر تقل عرض مجال تمرير الأذن.

إن المجال الترددي 300-3400 Hz هو مجال التردد القياسي للكلام ويستخدم هذا المجال في دارات نقل وتوصيل الكلام (الهاتف)، ولقد أثبتت التجارب التي قام بها المعهد **العالي**CCITT أنه يمكن نقل الكلام بشكل واضح من خلال المجال:

$$(3400 - 300)\,Hz = 3.1KHz$$

ب- المجال الترددي: 20KHz-30KHz

ويخصص هذا النوع من الأمواج لاتصالات المسافات الطويلة واتصالات تحت الماء (الغواصات) وفي المناجم العميقة. إن هذه الأمواج قادرة على اختراق وعبور المحيطات، وانتشار مثل هذه الأمواج راديوياً يتم بشكل أمواج أرضية، وبنماذج لأدلة موجة من الدرجة العالية على المسافات القصيرة، باعتبار أن الانتشار في المياه المالحة يخضع للتخامد ويزداد بسرعة مع زيادة التردد، فمن الضروري بناء وتصميم مستقبلات بمعادِلات أو مسويات Equalizers وبحساسية عالية في هذا النوع من الخدمات، وإن شدة الحقل للإشارات على المسافات البعيدة يكون مستقراً جداً، ويتغير بشكل طفيف (عدة ديسبلات) خلال اليوم والفصل، كما أن التغيرات الناتجة عن الفعاليات الشمسية تكون في حدودها الدنيا، أمَّا على المسافات الأقصر فهناك تغيرات إضافية، حيث إن تغيرات صفحة الإشارة يمكن أن تكون كبيرة خلال التغيرات اليومية وخصوصاً بوجود الإشعاع الشمسي والعواصف الرعدية. فيما يخص تصميم كافة الاتصالات فإن اعتبارات تغيرات الصفحة هنا هي أقل أهمية، ويكون الضجيج الموجود على الترددات المنخفضة جداً عالياً جداً وانبعاثياً Impulsive بشكلٍ كبير، لذلك فمن المهم في هذه المواقف إيجاد جمل لتقليل وحذف الضجيج، يجب أن تكون هوائيات الإرسال كبيرةً جداً وضخمةً لتحقيق فعالية مقبولة، ومع ذلك فإن حدود الضجيج تسمح أو تجيز استخدام هوائيات استقبال قصيرة نسبياً؛ لأنه يمكن إهمال ضجيج المستقبل بالمقارنة مع ضجيج الأتموسفير على سطح الأرض. في حالة الاستقبال تحت الماء، من المهم أن تكون الهوائيات بفعالية أكبر والمستقبلات ذات حساسية عالية وذلك لأن التخامد مرتفع جداً.

ج–المجالات الترددية **LF– MF** (الأمواج الطويلة والمتوسطة): يلعب الإنعكاس في الآينوسفير **Ionosphere** دوراً مهماً في انتشار هذه الأمواج وخصوصاً في المجالات الترددية المذكورة ضمن نطاق هذه الحزم. تستخدم هذه الأمواج بشكل أساسي في محطات البث الإذاعي وذلك لنقل البرامج من الإستوديو إلى المستمعين، ومن ناحية الانتشار فان الجزء الأخفض من هذه الترددات هي أمواج سطحية والجزء الآخر منها أمواج سماوية. بازدياد التردد يزداد التخامد الناتج عن امتصاص سطح الأرض (ذرات الماء والثلج) للأمواج الأرضية مع أن الضجيج يقل والمدى المفيد للأمواج السطحية (مسافة الانتشار) يقل خلال فترة النهار يتم تخامد الأمواج السماوية في الطبقة **D** من الاينوسفير، ومع الاقتراب من المجال الترددي **MF** فإن انعكاس الأمواج السماوية في النهار يكون ضعيفاً جداً للاستخدام. إن تخامد الأمواج السطحية خلال النهار يحد من مدى الاتصال ويتراوح ما بين عدة مئات الكيلومترات في الجزء الأدنى من المجال **MF** إلى /١٠٠/ كيلو متر في جزئها الأعلى. إن ضجيج الأتموسفير يحد من مدى الاتصال في المجال **MF** وبزيادة التردد يقل الضجيج ويكون أصغرياً في النهار الصافي (ساعات النهار المضاءة). يكون عامل الضجيج **Noise Figure (F)** منخفضاً وأقل تأثيراً من أجل كافة الضجيج المتشكل ضمن هذا المجال ما لم تكن الهوائيات وأنظمة ربط الهوائيات غير فعالة.، وفي الليل يقل تخامد الأمواج السماوية ويمكن أن يصل مدى الاتصال إلى آلاف الكيلومترات. في المسافات التي تمتد من /١٠٠/ كيلومتر إلى بضعة مئات الكيلومترات، حيث تقوم الأمواج السماوية بقفزة وحيدة (انعكاس وحيد) وتكون شدة هذه الأمواج مشابهة (مكافئة) لشدة الأمواج السطحية. يحصل الخفوت **Fading**(يحدث تلاشي واضمحلال للإشارة المستقبلة بسبب التداخل مابين الأمواج السماوية والأرضية). هذه الظاهرة (ظاهرة الخفوت) يمكن أن تصبح شديدة وعميقة فعلاً خلال الفترات التي تكون فيها الموجتان متساويتان تقريباً.

تضمحل وتخبو الأمواج السماوية في المجال الترددي **MF** بنتيجة دوران فراداي **Faraday Rotation**والاستقطاب الخطي للهوائيات، وفي بعض أجزاء المجال الترددي يحصل خفوت إضافي بسبب التداخل مابين الأمواج السماوية

والأرضية أو ما بين الأمواج السماوية نفسها بعدد مختلف من الانعكاسات، وعندما يحدث الخفوت بسب تداخل موجتين أو أكثر كنتيجة لانتشارهم عبر مسارات (طرق) بأطوال مختلفة، وبالتالي فإن الترددات المختلفة لطيف الإشارة المرسلة يمكن أن تتخامد بشكل مختلف، تدعى هذه الظاهرة بالخفوت المنتقى أو المختار **Selective Fading**، وبالنتيجة تتشوه الإشارة المستقبلة بشكل كبير باعتبار أن الكثير من ترددات الحزمة **MF** يستخدم في تطبيقات البث الإذاعي **AM**، حيث لا يوجد اهتمام كبير بتصميم المستقبلات لإزالة تأثيرات الخفوت المختار، لذلك فمع اقتراب الترددات من المجال الترددي **HF** تصبح هذه الترددات أساسية في تطبيقات اتصالات المسافات الطويلة، وبالتالي سنواجه المتطلبات الدقيقة لتصميم المستقبلات. يمكن أن يحدث جزء من البث الإذاعي في المجال الترددي **LF**، وتسيطر تطبيقات الاتصالات متوسطة المدى وضيقة العصبة والملاحة اللاسلكية في المجال الترددي**LF** ، والجزء الأدنى من المجال **MF**.

د–المجال الترددي **HF** (أمواج قصيرة): استمر استخدام هذا المجال بشكل كبير في نقل الإشارات الصوتية أو الإشارات ذات الحزمة الأوسع ولمسافات طويلة جداً (تصل لغاية **10000 km**) حتى ظهور أو حلول الأقمار الصناعية المخصصة للاتصالات اللاسلكية. التخامد الكبير في الأمواج السطحية والتشوهات التي تتعرض لها الأمواج السماوية المنعكسة وانتشار إشارات التداخل لمسافة طويلة جعل الإرسال في المجال الترددي **HF** بشكل عام غير مناسب لاتصالات المسافات القصيرة. من ثلاثينيات القرن العشرين **(1930s)** إلى بداية السبعينيات **(1970s)** كانت الاتصالات الراديوية **HF** الوسيلة الرئيسية في نقل الإشارات الصوتية والمعطيات وإشارات الصور لمسافات طويلة، بالإضافة إلى خدمات الاتصالات فوق البحار، وفي الجو وبعض اتصالات التجوال الأرضي والملاحة اللاسلكية، وحتى هذا اليوم ما تزال الخدمات في هذا المجال فعالة ونشطة، ويعتبر التداخل على المسافات الطويلة أحد المشاكل الرئيسية في هذا المجال وذلك لاعتماده على الأمواج السماوية، حيث إن إشارات **HF** تخضع لتأثير الخفوت المنتقى والناتج عن تداخل الإشارات عريضة الحزمة. إن ترددات هذا

المجال عرضة لتغيرات اليوم والفصل بالإضافة إلى التغيرات العشوائية الناتجة عن تأين الطبقة الأعلى من الآينوسفير.

هناك فروقات واضحة في تغطية هذا النوع من الاتصالات ما بين الليل والنهار، ومابين الصيف والشتاء. باعتبار أن الإشارات المستقبلة تقطع مساراتٍ وطرقاً مختلفة فهي معرضة بشكل كبير للخفوت، والخفوت المختار الشائع جداً. يبقى ضجيج الأتموسفير مرتفعاً في القسم الأدنى من هذا المجال الترددي ويمكن إهماله عندما يتجاوز التردد العامل **20 MHz**.

لذلك يجب تصميم المستقبلات العاملة في هذا المجال الترددي بحساسية عالية وبإدخال تقنيات لحذف وتقليل الضجيج النبضي باعتبار أن التردد العامل يجب تغييره بشكل دوري للحصول على استمرارية اتصال مقبول، فان معظم أجهزة الاستقبال **HF** تتطلب تغطيةً لكامل المجال الترددي وعادة ما يتم استخدام القسم الأعلى من المجال **MF**.

في كثير من التطبيقات، يجب أن تبنى التصميمات بحيث يتم التغلب على الخفوت، والطريقة الأبسط لإنجاز ذلك هو استخدام جمل أو دارات تحكم آلي بالربح **AGC**. باعتبار أن الإشارات المستقبلة عبر طرق ومسارات مختلفة تتعرض إلى خفوت بشكل مستقل، فإن المطلوب غالباً هو استخدام تقنيات استقبال التنوع (الاختلاف). يمكن إنجاز هذه التقنيات باستخدام هوائيات منفصلة أو هوائيات باستقطاب مختلف أو باستخدام ترددات مختلفة بالإضافة إلى استقبال التنوع الزمني، للتغلب على الخفوت والحصول على خرج أفضلي.

في التصميم الحديث للمستقبلات يتم استخدام تقنيات المعادِلات أو المسويات المتكيفة**Adaptive Equalizers** للتغلب على مسألة تعدد المسارات التي تسبب الخفوت المختار في الإرساليات عريضة العصبة. يمكن استخدام تقنيات الطيف المنتشر **Spread spectrum** ضمن عرض العصبة المتاح للتغلب على التداخل وحذف وتقليل التشويش **jamming** ويعتبر استخدام هذه التقنيات مطلباً أساسياً ومهماً في الأجهزة العسكرية. إن الاستخدام العسكري لكثير من التصميم المستقبلي لنظم الاتصال في مجال **HF** له الحظ الأوفر، وذلك لأن الاتصالات المدنية

(التجارية) تخلت عن هذا المجال وتم الانتقال إلى تقنيات تستخدم مجالات ترددية أخرى كالاتصال بالأقمار الصناعية والألياف الضوئية.

هـ-الأمواج VHF 30MHz-300 MHz (أمواج قصيرة جداً): وهي معدة للانتشار لمسافات قصيرة وانتشار ما يعرف بخط الرؤية وبهوائيات مرتفعة، وعلى الأقل في إحدى نهايتي مسار الانتشار. بالإضافة إلى خدمات البث الإذاعي *FM* والإرسال التلفزيوني (بث تلفزيوني)، يتم استخدام جزء من أمواج VHF في الاتصالات مع الطائرات والملاحة الجوية وخدمة التجوال الأرضي وخدمة المحطات الثابتة. إن الأطوال الموجية تصبح صغيرة بشكل كافٍ للانعكاس عن العوائق والهيئات الأرضية والأبنية وبعض المركبات، وعادة ما تكون نتيجة ضياع الانعكاسات في الانتشار عبر هذه المسارات ضعيفة بشكل كبير مقارنة بالانتشار عبر مسارات خط الرؤية. في خدمات التجوال الأرضي، يمكن أن تكون واحدة أو اثنين من المحطات النهائية منخفضة نسبياً، وبالتالي فإن انحناءات الأرض والهضاب والتلال تعيق مسارات خط الرؤية المباشر وعليه فإن المدى يمتد بشكل طفيف بسب الانحراف، وفي كثير من الحالات فإن الإشارة تصل إلى محطة الاستقبال عبر انعكاسات تعدد المسار وبشدة متغيرة وبطريقة عشوائية وتختلف من مكان إلى آخر. يوصف الضجيج في هذا المجال على أنه حراري بالإضافة إلى الضجيج الصنعي الذي ينتج إشارات تداخل نبضي (انبعاثي). في خدمات التجوال مع المراكب والعربات تشكل المركبة بحد ذاتها منبعاً للضجيج. عادة ما يتم تصميم مستقبلات الاتصالات العاملة في هذا المجال بحساسية عالية وبتقنيات تأخذ بعين الاعتبار إشارات التداخل القوية. بالسعي لتطوير وزيادة معدل إرسال المعطيات، فإن إدخال المعادلات أو المسويات المتكيفة **Adaptive Equalizers** يكون مطلباً هاماً في بعض التطبيقات. تستخدم اتصالات التجوال العسكري الأرضي جزءاً من هذا المجال، وبوجود تصميمات الطيف المنتشر. في الجزء الأدنى من هذا المجال، تنشأ نماذج لتبعثر الإشارات عن الاينوسفير والانعكاسات عن النيازك ويمكن أن تستخدم للأغراض الخاصة.

والمجال الترددي **UHF 300MHz-3 GHz**: إن خصائص الانتشار في هذا المجال مشابهة إلى حد كبير لخصائص الانتشار في المجال**VHF**، عدا عن تأثير

الآينوسفير على الجزء الأدنى من **VHF**. حيث تتأثر أمواج المجال **UHF** كثيراً بتساقط المطر ويظهر التخامد والاضمحلال الناتج عن سقوط المطر بشكل واضح. في المجال **UHF** والمجالات الأعلى يتم استخدام خطوط اتصال عبر التربوسفير **Troposphere**. نستخدم هوائيات غير موجهة صغيرة جداً وعواكس ومصفوفات لتأمين التوجهية. الانتشار الراديوي في القسم الأعلى من المجال **UHF** مشابه لانتشار الضوء، من حيث الانعكاس السهل نسبياً عن العوائق والأغراض المحلية والانعكاس الفعال عن المراكب. تستخدم الاتصالات الراديوية الخلوية التلفونية التشابهية منها والرقمية هذا المجال، كما إن الاتصال ما بين الأرض والمراكب الفضائية يحدث في هذا المجال. وأنظمة الاتصال العسكري والملاحة والرادار تستخدم هذا المجال الترددي باعتبار أن الأطوال الموجية قصيرة جداً في هذا المجال الترددي فإنه يمكن تحقيق تنوع في الهوائيات وتصميم مستقبلات تحوي على جملٍ للحذف المتكيف للتداخل والتشويش بالإضافة إلى المسويات المتكيفة **Adaptive Equalizers**. إن تطوير وزيادة معدل إرسال المعطيات ممكن ومتاح باستخدام تشكيلة واسعة من مخططات تعديل المعطيات.

و- المجال الترددي: **SHF 3-30 GHz**

يستخدم اتصالات من نوع خط النظر بشكل واسع وبهوائيات تملك شكل قطعٍ مكافئ (صحون أو دشات) ذات ربح عالي (ربح هوائي صحني بقطر /٢/ متر حوالي 40dB)، كما يستخدم هذا المجال الترددي في اتصالات الأقمار الصناعية وأنظمة الرادار والاتصالات عريضة الحزمة بالإضافة إلى أنظمة الدعم العسكري وأنظمة تحديد المواقع (أنظمة ملاحية مثلGPS). الاتصالات في هذا المجال ذات وثوقية عالية، والشروط البيئية المحيطة التي يمكن أن تؤثر على قوة الإشارة في هذا المجال هي المطر الثقيل والنظام الشمسي.

يمكن أن يكون لشروط الطقس (مطر وضباب) تأثير سيئ في مجال Ku Band وأقل في C Band إن تأثير الضجيج الحراري والفضائي على الإشارات الضعيفة المستوى يتطلب استخدام مكونات الكترونية بمواصفات ضجيج منخفضة في تجهيزات خدمة اتصالات الأقمار الصناعية.

المراجع

[1] VHF/UHF/Microwave Radio Propagation: A Primer for Digital experimenters, Barry McLarnon, VE3JF, 2696 Regina St.Ottawa, 2009.

[2] Kenwood VHF digital repeater NX-710, Kenwood UK, 2015.

[3] Radio Network Planning and Resource Optimization: Mathematical Models and Algorithms for UMTS, WLANs, and Ad Hoc Networks, Iana Siomina, 2006.

[4] أساسيات هندسة الاتصالات اللاسلكية الأرضية, م. سامي عليو ,2018.

[5] مبادئ الاتصالات، د.م. محمد سامي حاجي علي، د.م. عبد القادر أبو حجر.