

## مقدمة في نظم اتصالات المنصات المسيرة

عد الله أبو بكر أبو عربية

جامعة مصراتة، قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية،

مصراتة، ليبيا

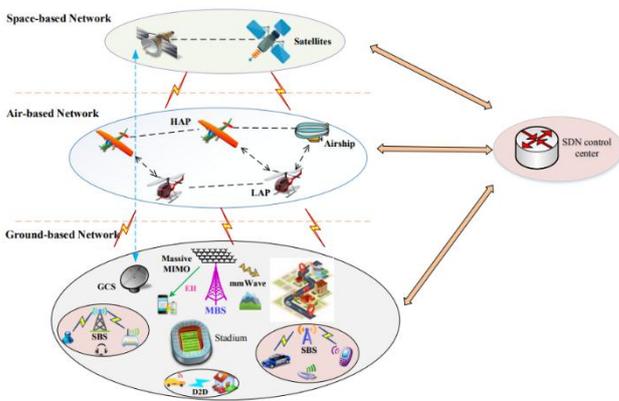
a.abuarabia@eng.misuratau.edu.ly

### 1.1. نظم المنصات الجوية

تشهد نظم الاتصالات اللاسلكية المحمولة جوا حاليا اهتماما متزايدا نظرا لمساحة التغطية التي توفرها مقارنة بتغطية النظم التقليدية الأرضية مع انخفاض تكلفة الإنجاز وسرعة التنفيذ عند استخدامها في المناطق النائية المفتوحة أو صعبة التضاريس لتوفير التغطية لخدمات شبكات الاتصالات الأرضية، كذلك إمكانية تكاملها مع الشبكات الأرضية لاستخدامها مؤقتا في الدعم ورفع الضغط عن المحطات الأرضية في حالة التجمعات المكتظة. يوضح الشكل (1) استخدام نظم المنصات الجوية مع النظم الأرضية كشبكات متكاملة لتوفير خدمة اتصال متعدد التطبيقات في بيئات انتشار مختلفة.

يعتبر ارتفاع المنصة الجوية من العوامل المهمة التي تؤثر في كفاءة الأداء وبالتالي نطاق التغطية نظرا لارتباط ذلك بقوة الإشارة المستقبلية كدالة في كل من احتمالية الاتصال المباشر وتخمين مسافة انتشار الإشارة، حيث تصنف نظم الاتصالات المحمولة جوا حسب ارتفاعها عن سطح البحر إلى ثلاثة أنواع كالتالي:

- نظم الأقمار الصناعية التي تعتمد على منصات مثبتة في الفضاء الخارجي على ارتفاع يتراوح من 400 إلى 36000 كم.
- نظم المنصات عالية الارتفاع (High Altitude Platforms HAPS) وهي محطات اتصالات مثبتة في طبقة الستراتوسفير من الغلاف الجوي على ارتفاع ما بين 17 و 22 كم.
- نظم المنصات منخفضة الارتفاع (Low Altitude Platforms LAPS) المعتمدة على استخدام منصات ثابتة كمنطيد الهيليوم (Helikite balloons) أو منصات متحركة كالبالونات المسيرة (UAVs) على ارتفاع لا يتجاوز 5 كم [1].



شكل 1. الإطار التكامل بين الشبكات الأرضية وشبكات المنصات الجوية [1].

### 2.1. المنصات المسيرة كنظم لاسلكية

تعمل نظم الاتصالات بالمنصات المسيرة على توفير خدمة الاتصالات اللاسلكية بجودة تعتمد على عدة معايير تهدف إلى تزويد الاتصال الآمن مع معدل ترانس مرتفع يناسب التطبيقات. كما يمكن تنفيذ مفهوم حصاد الطاقة (Energy harvesting) لاسلكيا كتطبيق استخدام عبر نظم المنصات المسيرة [1] حيث تقوم الخلايا الكهروضوئية المثبتة على سطح المنصة المسيرة بتحويل الطاقة الشمسية

المخلص - تُعتبر نظم الاتصالات بالمنصات المسيرة من التقنيات الحديثة في مجال الاتصالات اللاسلكية والتي يمكن الاستفادة منها أيضا في تطبيقات أخرى مدنية أو عسكرية. مقارنة بنظم الاتصالات الأرضية ذات المحطات الثابتة، فإن نظم الاتصالات بالمنصات المسيرة تمتاز بمرونة التطوير ووقت نشر قصير لتزويد خدمات الاتصالات أثناء تعطل شبكات النظم الأرضية التقليدية جزئيا أو كليا كما في حالات الحروب والكوارث الطبيعية. سيتم في هذه المقالة التعريف بأساسيات نظام الاتصال بالمنصات المسيرة ومن ثم النمذجة الرياضية لكل من الانتشار الراديوي واستهلاك القدرة في المنصة المسيرة لتحليل الأداء عن طريق المحاكاة في ظروف تشغيل مختلفة.

الكلمات المفتاحية: منصة مسيرة، نمذجة القناة، خط الرؤية، نمذجة استهلاك القدرة، سرعة طيران أمامية.

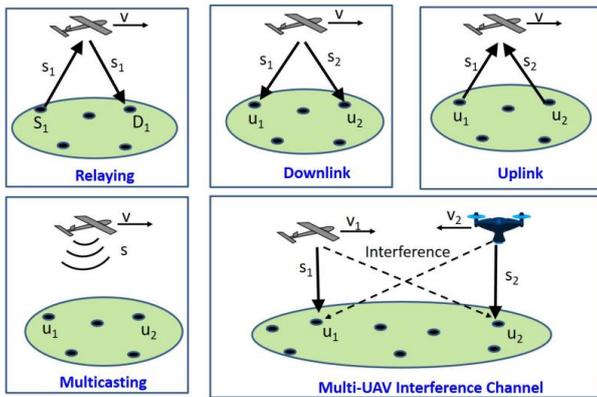
### 1. المقدمة

نظم الاتصالات بالمنصات المسيرة أو نظم الطيران المسير هي إحدى تقنيات الاتصالات اللاسلكية بالمنصات المحمولة جوا وتعتمد على مركبة جوية غير مأهولة (Unmanned Aerial Vehicle UAV) تعمل بسرعة طيران معينة على ارتفاع محدد لزمان معين ويتم التحكم فيها عن بعد، وكانت تستخدم بشكل أساسي لأغراض التصوير العسكري وجمع المعلومات أما في الأونة الأخيرة زاد الاهتمام بها في المجالات المدنية حيث يتم استخدام نظم الاتصالات المسيرة كنقطة ترحيل مؤقت بين عدة شبكات أرضية، أو كنقطة توصيل بين المحطات الأرضية ومنصات نظم الاتصالات الأكثر ارتفاعا كنظم المنصات عالية الارتفاع الستراتوسفيرية والأقمار الصناعية [1]-[4]. تمتلك نظم الاتصالات بالمنصات المسيرة عدة خصائص تجعلها من التقنيات الواعدة في تزويد خدمات الاتصالات بشكل دائم أو مؤقت، حيث تتميز نظم المنصات المسيرة بانخفاض تكلفة الإنجاز ومرونة الاستخدام مع قدرة مرتفعة للإشارة المستقبلية مقارنة بنظم الاتصالات الأرضية التقليدية بسبب الاحتمالية المرتفعة للاتصال المباشر عبر خط الرؤية التي توفرها المنصات المسيرة، وأيضا لانخفاض تخمين الانتشار مقارنة بنظم الأقمار الصناعية [2]. مع ذلك وبالرغم من الميزات التي توفرها تقنية النظم المسيرة في تزويد خدمات الاتصالات اللاسلكية إلا أنها تواجه بعض المشاكل الفنية التي تحد من أداءها، ومن أبرز ذلك تأثير موثوقية قناة الاتصال اللاسلكية في نظم المنصات المسيرة بالعوامل الجوية كالرياح والأمطار بالإضافة إلى مشكلة محدودية طاقة التشغيل التي تؤثر في زمن الخدمة الفعلي الذي تقضيه المنصة المسيرة في الجو [2]، [3].

تهدف هذه المقالة إلى التعريف بنظام الاتصال بالمنصات المسيرة كتقنية حديثة في الاتصالات اللاسلكية، حيث سيتم التعرف في بقية الجزء الأول من المقالة على تصنيف نظم الاتصالات المحمولة جوا وكذلك أنماط الاستخدام للنظم المسيرة في تزويد خدمات الاتصالات اللاسلكية، أما التوصيف الرياضي لنماذج القناة واستهلاك القدرة في نظم الاتصالات بالمنصات المسيرة فهو موضح بالجزء الثاني والثالث على الترتيب، وأخيرا الخلاصة فهي مبنية في الجزء الرابع.

استلمت الورقة بالكامل في 7 ديسمبر 2020 وروجعت في 31 يناير 2021  
وقبلت للنشر في 15 فبراير 2021

ونشرت ومناحة عل الشبكة العنكبوتية في 1 مارس 2021



شكل 2. تشكيلات استخدام المنصات المسيرة كنظم لاسلكية مساعدة [2].

## 2. نمذجة الانتشار الراديوي في نظم المنصات المسيرة

تهدف عدة أبحاث إلى تطوير استخدام نظم المنصات المسيرة كمحطات جوية للاتصالات اللاسلكية من خلال نماذج تختص بتحليل الأداء كما في [3] و [4]، تخطيط الخلايا مشتركة القناة [5]، التعايش المشترك بين عدة منصات تعمل على نفس التردد [6]، أو تحسين الكفاءة كدالة في استهلاك القدرة [7] - [9]. يعتبر تخطيط منطقة خدمة المنصات المسيرة من خلال نمذجة انتشار الإشارة بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية من الأسس التي تضمن اتصالاً موثقاً بينهما مع الحد الأدنى لمتطلبات التراسل، ويتم ذلك من خلال نماذج مخصصة للتعامل مع تخميد الانتشار إضافة إلى الخبو (خفوت الإشارة) بشقيه صغير وكبير المدى. تهتم هذه المقالة بدراسة نموذجي الفراغ الحر واعتمادية زاوية الارتفاع في توصيف انتشار الإشارة في نظم المنصات المسيرة، حيث يستخدم نموذج الفراغ الحر الذي يتميز ببساطته في دراسة تخميد المسافة لحالات الاتصال المباشر بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية؛ بينما تستخدم النماذج المعتمدة على زاوية ارتفاع المنصة المسيرة لتوصيف أكثر واقعية يشمل تخميد المسافة والخبو كدالة في احتمال توفر خط رؤية مباشر بين طرفي التراسل.

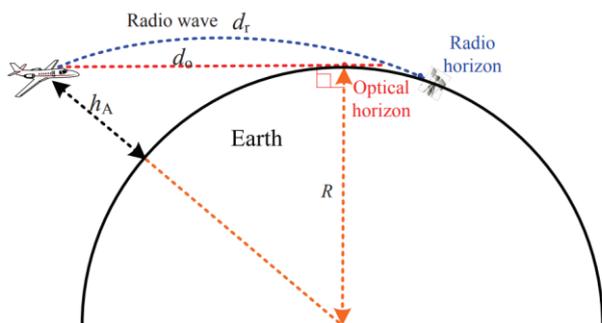
### 1.2. نموذج الفراغ الحر

بافتراض منصة مسيرة تتواصل مع عقدتها الأرضية الثابتة عبر مسار رؤية مباشر (Line of Sight LoS) بين طرفي التراسل كما هو موضح في مخطط الشكل (3)، وباعتبار  $h_A \ll R$  فإن مسافة الأفق البصري ( $d_0$ ) بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية يمكن وصفها تحت تأثير تقوس سطح الأرض كالآتي:

$$d_0 = \sqrt{h_A(h_A + 2R)} \approx \sqrt{2k_e R h_A} \quad (1)$$

حيث  $R$  نصف قطر الأرض،  $h_A$  تمثل ارتفاع المنصة المسيرة، و  $k_e$  ثابت يوضح تأثير كل من تقوس سطح الأرض والحالة الجوية على الانتشار اللاسلكي للإشارة. يأخذ الثابت  $k_e$  القيمة  $\frac{4}{3}$  تحت الظروف المناخية العادية وعندئذ يمكن تقريب المسافة الراديوية ( $d_r$ ) للإشارة كالتالي [10]:

$$d_r \approx 4.12\sqrt{h_A} \quad (2)$$



إلى كهربائية لشحن بطارية التشغيل، مع إمكانية إرسال الطاقة لاسلكياً من المنصة المسيرة لشحن المعدات الطرفية الأرضية بجانب الاستخدام كنظام اتصال للبيانات. يوضح الجدول (1) بعض تطبيقات الاستخدام للمنصات المسيرة وفقاً لمعايير تقنية تتعلق بالارتفاع ومعدل التراسل في الاتجاهين الصاعد والنازل.

جدول 1. معايير الاستخدام لتطبيقات مختلفة في نظم المنصات المسيرة [2].

حالة الاستخدام	ارتفاع المنصة المسيرة	معدل التراسل (DL/UL)
التصوير الجوي	100 m	300 Kbps/30 Mbps
نقطة وصول للاتصالات اللاسلكية	500 m	50 Mbps/50 Mbps
المراقبة والاستكشاف	100 m	300 Kbps/10 Mbps
البحث والإنقاذ	100 m	300 Kbps/6 Mbps
خدمة التوصيل	100 m	300 Kbps/200 Kbps

يعتبر استخدام المنصات المسيرة كقنوات وصول من التطبيقات المهمة في تزويد خدمة الاتصال اللاسلكي عبر النظم المحمولة جواً، حيث تعتمد نظم الاتصالات بالمنصات المسيرة في ذلك على ثلاث تشكيلات أساسية للربط بينها وبين عقدها الأرضية وهي: وصلة مباشرة، وصلة فضائية، وكنظام لاسلكي مساعد. وفيما يلي توضيح لتشكيلات استخدام المنصات المسيرة كقنوات وصول لاسلكية:

### أ. الاستخدام كوصلة مباشرة

وصلة لاسلكية تشكيلة نقطة لنقطة لتتيح الاتصال المباشر بين منصة مسيرة وعقدتها الأرضية، وتعمل هذه الوصلة على نطاق ترددي غير مرخص وتتميز بالبساطة وانخفاض التكلفة وتستخدم في النشاطات التجارية المؤقتة. من عيوبها أنها توفر اتصال غير آمن وبالتالي تكون معرضة للتداخل والتشويش إضافة إلى مشاكل الحجب عند عدم توفر خط الرؤية المباشر بين طرفي التراسل.

### ب. الاستخدام كوصلة فضائية

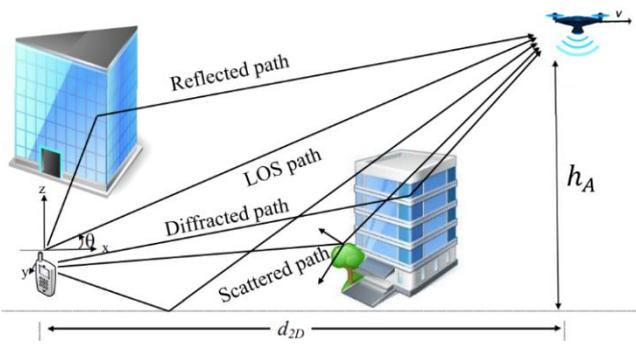
وصلة لاسلكية أيضاً تعمل في نطاق الترددات الضوئية بتشكيلة نقطة لنقطة توفر الاتصال البصري بين المنصة المسيرة والقمر الصناعي، ويتم من خلالها تزويد خدمة الاتصال اللاسلكي مثلاً لنظم الملاحة البحرية في أعالي البحار نظراً لتعذر توفر الاتصالات عبر النظم الأرضية التقليدية حيث يتم استخدام المنصات المسيرة كقنوات ترحيل بين العقدة الأرضية والقمر الصناعي. من عيوبها ارتفاع قيمة كل من التأخير الزمني وتخميد المسار الحاصل للإشارة بسبب ارتفاعات الأقمار الصناعية مما يؤثر سلباً على جودة الإشارة من ناحية معدلات الإرسال.

### ج. الاستخدام كنظام لاسلكي مساعد

يعتبر استخدام المنصات المسيرة كنظم لاسلكية مساعدة من التقنيات الواعدة التي تدعم زيادة السعة ونطاق التغطية في شبكات الاتصالات الأرضية، حيث تتصرف المنصة المسيرة كمحطة جوية (نقطة وصول) تعمل على توفير خدمة الاتصال بناء على الطلب للمساعدة في تخفيف الضغط على المحطات القاعدية الأرضية كما في حالات الازدحام المؤقت بالملاعب الرياضية مثلاً؛ أو لزيادة نطاق تغطية النظم الخلوية خصوصاً في المناطق البرية صعبة التضاريس وفي أعالي البحار.

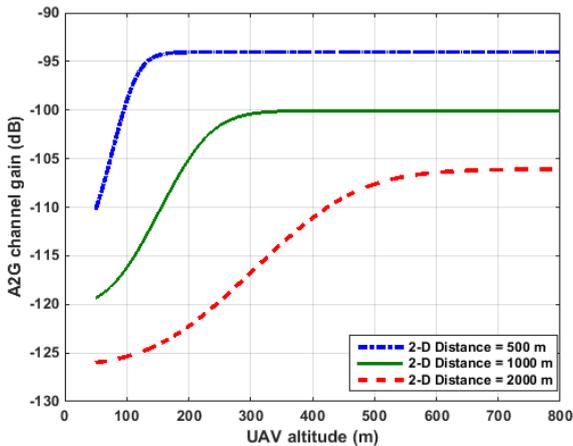
يوضح الشكل (2) مخططاً لعدة نماذج تتعلق باستخدام المنصات المسيرة كنظم لاسلكية مساعدة. في النموذج الأول تمتلك المنصة المسيرة وصلتين صاعدة ونازلة لترحيل البيانات بين نقطتين أرضيتين (المصدر والمقصد)، النموذج الثاني تكون فيه المنصة كنظام مستقل له مسار نازل فقط يرسل المعلومات إلى نقاط استقبال أرضية منفصلة، وتكون المنصة الجوية ذات المسار الصاعد فقط كنقطة استقبال من عدة عقد إرسال أرضية مستقلة بالنموذج الثالث، بينما تستخدم المنصة المسيرة كنقطة بث في النموذج الرابع لإرسال البيانات إلى عدة عقد أرضية تزامنياً، وأخيراً عدة منصات مسيرة تتواصل مع نقاطها الأرضية تحت تأثير تداخل القنوات المشتركة في النموذج الخامس.

حيث  $\theta$  زاوية الارتفاع بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية، و  $A$  و  $B$  ثوابت نموذج اعتمادية زاوية الارتفاع.

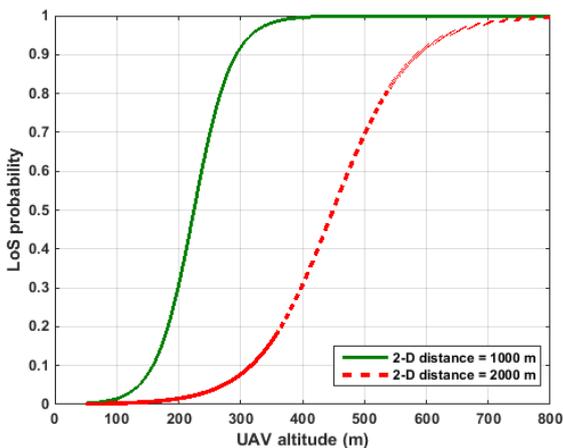


شكل 5. مخطط الانتشار الراديوي لنظام منصة مسيرة باستخدام نموذج اعتمادية زاوية الارتفاع.

يوضح الشكل (6) محاكاة لكسب القناة (A2G) في بيئة انتشار لها ثابت تخميد  $\alpha = 2.4$  وعند تردد تشغيل 2.4 GHz كدالة في ارتفاع المنصة المسيرة، بينما الشكل (7) يبين علاقة احتمالية توفر خط الرؤية المباشر بارتفاع المنصة المسيرة عند عدة خيارات لمسافة الفصل الأفقية  $d_{2D}$  بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية الثابتة، حيث يلاحظ تحسن كسب القناة كلما زاد ارتفاع المنصة المسيرة وانخفضت مسافة الفصل الأفقية فيؤدي ذلك إلى زيادة فرص الاتصال عبر خط الرؤية المباشر. كما يلاحظ أيضا من الشكل (6) أن تحسن كسب القناة يظل تقريبا ثابتا عند زيادة الارتفاع بعد قيمة معينة نظرا لهيمنة تخميد مسافة الانتشار. الجدير بالذكر هنا أن تخميد الانتشار يزداد مع ارتفاع المنصة المسيرة، لذا يجب الموازنة بين زيادة فرص الاتصال عبر مسار الرؤية المباشر وتقليل تخميد الانتشار الحاصل للإشارة بزيادة الارتفاع من أجل تحسين كفاءة القناة.



شكل 6. كسب القناة في نظام منصة مسيرة باستخدام نموذج اعتمادية زاوية الارتفاع.



شكل 7. علاقة احتمالية الاتصال المباشر بارتفاع المنصة المسيرة.

شكل 3. مخطط الانتشار الراديوي في الفراغ الحر لنظام منصة مسيرة [10].

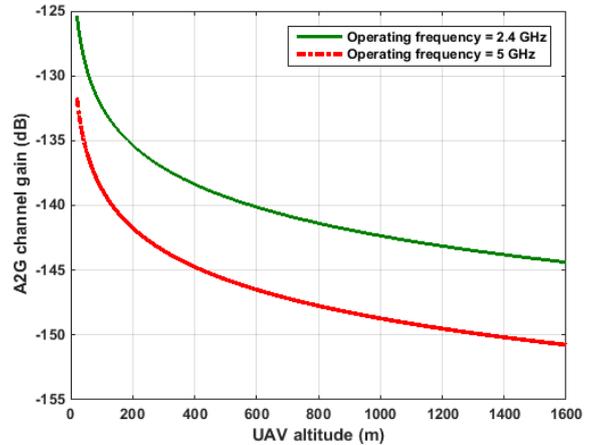
تتغير مسافة انتشار الإشارة وفقا للمعادلة (2) تبعا لتفاوت ارتفاع المنصة المسيرة، لذا فإنه يمكن التعبير عن كسب القناة للمسار النازل من المنصة المسيرة إلى العقدة الأرضية (Air to Ground A2G) وفقا لنموذج الفراغ الحر كالتالي [8]، [10]:

$$g(d_r, h_A) = \beta_0 d_r^{-2} \quad (3)$$

حيث  $\beta_0$  تمثل كسب القناة عند مسافة انتشار مرجعية مقدارها متر واحد وتعرف رياضيا بدلالة الطول الموجي  $\lambda$  للإشارة كالتالي:

$$\beta_0 = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \quad (4)$$

يبين الشكل (4) محاكاة لكسب القناة (A2G) وفقا للمعادلة (3) كدالة في ارتفاع المنصة المسيرة عند ترددي تشغيل مختلفين، حيث يلاحظ ارتفاع تخميد الإشارة المستقبلية بازدياد كل من التردد والارتفاع نظرا لزيادة فرص تشتت الإشارة مع صغر طولها الموجي وأيضا لزيادة مسافة الانتشار الراديوي بزيادة ارتفاع المنصة المسيرة. مع ذلك يبقى استخدام نموذج الفراغ الحر غير دقيق عمليا لحالات عدم ثبوت موضع المنصة المسيرة أو عقدتها الأرضية، وأيضا في البيئات الغنية بالعوائق بين طرفي التراسل لما تسببه من خبو متنوع للإشارة؛ لذا يتطلب الأمر توصيفا آخر يعكس تغير بيئة الانتشار كدالة مثلا في احتمالات توفر مسار الرؤية المباشر بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية.



شكل 4. كسب القناة في نظام منصة مسيرة باستخدام نموذج الفراغ الحر.

## 2.2. نموذج اعتمادية زاوية الارتفاع

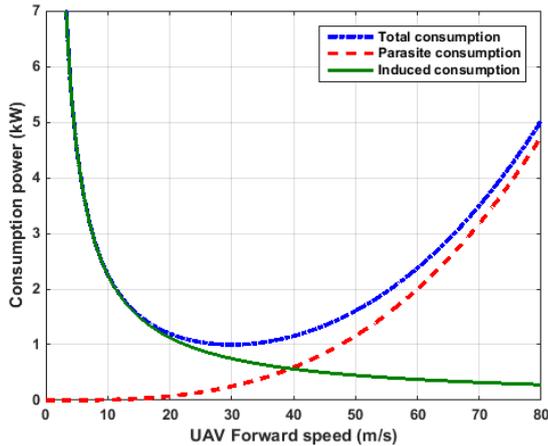
يعتبر نموذج زاوية الارتفاع من النماذج المستخدمة في تمييز خصائص مسار الانتشار الراديوي في نظم المنصات المسيرة اعتمادا على احتمالات توفر خط الرؤية المباشر من عمده تحت تأثير وجود العوائق بين المرسل والمستقبل. يوصف كسب قناة الاتصال (A2G) بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية وفقا لنموذج زاوية الارتفاع بالمعادلة الآتية [2]، [11]:

$$g(d_{2D}, h_A) = P_{LoS}(\theta)\beta_0 d^{-\alpha} + (1 - P_{LoS}(\theta))k\beta_0 d^{-\alpha} \quad (5)$$

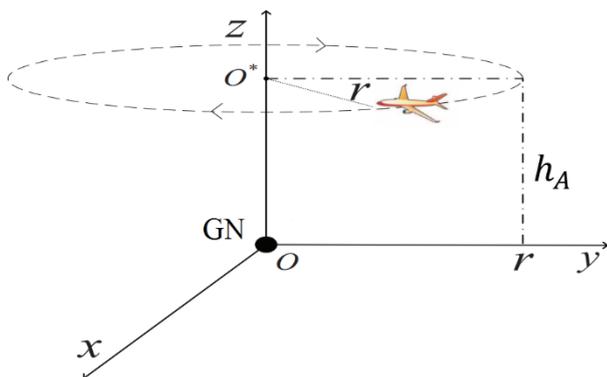
حيث  $d_{2D}$  هي المسافة الأفقية (ثنائية البعد  $(x,y)$  حيث  $z=0$ ) الفاصلة بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية كما هو موضح بمخطط الشكل (5)، ثابت تخميد المسار،  $\beta_0 d^{-\alpha}$  تمثل كسب القناة عند مسافة انتشار  $d$  للإشارة مع توفر مسار رؤية مباشر بين طرفي التراسل، بينما  $k\beta_0 d^{-\alpha}$  كسب القناة في حالة عدم توفر مسار رؤية مباشر،  $k$  ثابت يمثل معامل التوهين لحالة عدم توفر خط الرؤية المباشر بقيمة أقل من 1، و  $P_{LoS}(\theta)$  هو احتمال توفر خط رؤية مباشر ويمكن إيجاده وفقا للمعادلة الآتية [11]:

$$P_{LoS}(\theta) = \frac{1}{1 + A \exp(B(A - \theta))} \quad (6)$$

## 3. نمذجة استهلاك القدرة في نظم المنصات المسيرة

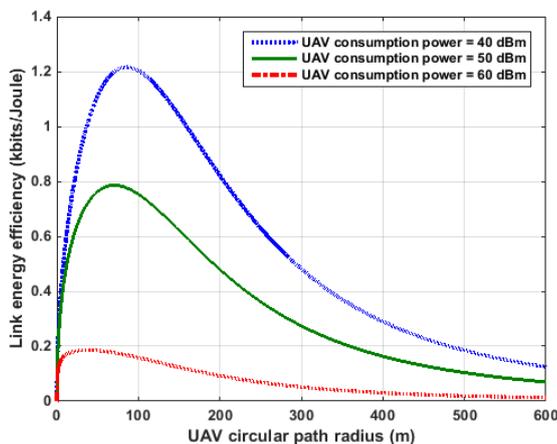


شكل 8. أنماط استهلاك القدرة في مسيرة ذات الجناح الثابت.



شكل 9. مخطط مسار طيران دائري لمنصة مسيرة ذات الجناح الثابت.

يوضح الشكل (10) محاكاة كفاءة الطاقة للوصلة النازلة (A2G) عندما  $\bar{\gamma} = 50 \text{ dB}$  وذلك عند قيم مختلفة لقدرة الاستهلاك لمنصة مسيرة ذات جناح ثابت تتواصل مع عقدها الأرضية من على ارتفاع 200 متر ولها مسار حركي دائري حول العقدة الأرضية الثابتة، حيث يلاحظ أن الكفاءة لها قيمة قصوى عند قيمة معينة لنصف قطر مسار طيران المنصة المسيرة لتبدأ بالانخفاض بعدها نظرا لانخفاض قوة الإشارة المستقبلية مع ابتعاد المنصة عن عقدها حيث تقل احتمالات الاتصال المباشر ويزداد تخميد الانتشار مع ابتعاد المنصة المسيرة عن عقدها الأرضية.



شكل 10. كفاءة استهلاك الطاقة في نظام منصة مسيرة ذات الجناح الثابت.

## 2.3. نموذج مسيرات الجناح الدوار

تم حديثاً تنفيذ عدة مشاريع لتزويد خدمة الإنترنت عبر منصات جوية تعتمد في عملها على الطاقة الشمسية كما هو الحال في مشروع (loon) و (skybender) المدعومين من شركة غوغل ومشروع (Aquila) من شركة فيس بوك [8]، لكن تظل مشكلة نضوب الطاقة من التحديات التي تؤثر في كفاءة عمل نظم الاتصالات المحمولة جواً عموماً وفي نظم المنصات الجوية المسيرة خصوصاً، حيث يتطلب الأمر أن تبقى المنصة المسيرة مرتفعة ومتحركة بسرعة معينة وقت توفير خدمة الاتصال مع أقل استهلاك قدرة ممكن للرفع من كفاءة الطاقة في نظام المنصة المسيرة. تصنف قدرة الاستهلاك في المنصات المسيرة إلى نمط استهلاك يخص تشغيل المنصة المسيرة (الطاقة اللازمة للطيران والإقلاع والتحويم) ونمط آخر يخص قدرة إرسال الإشارة (البيانات) عبر قناة الاتصال اللاسلكية. تعتمد كمية استهلاك قدرة التشغيل في نظم المنصات المسيرة على عدة معاملات منها وزن وطبيعة المركبة المسيرة (من ناحية الأجنحة) وأيضاً على مقدار قوة الدفع الناشئة عن مقاومة الهواء أثناء الطيران، وبالتالي يمكن نمذجة استهلاك القدرة اللازمة لعمل المنصة المسيرة كدالة في طبيعة طيران المنصة من خلال نموذجين أحدهما لذات الجناح الثابت والآخر مخصص للمنصات ذات الجناح الدوار كما هو موضح بالآتي:

## 1.3. نموذج مسيرات الجناح الثابت

بافتراض مسيرة ذات جناح ثابت تتحرك مستوية على ارتفاع ثابت، فإن استهلاك القدرة اللازمة لتشغيل المنصة المسيرة يعبر عنه كالآتي [9]:

$$P(V) = \underbrace{c_1 V^3}_{\text{parasite}} + \underbrace{\frac{c_2}{V}}_{\text{induced}} \quad (7)$$

حيث  $c_1$  و  $c_2$  ثوابت تعتمد على كثافة الهواء ووزن المنصة المسيرة ومساحة سطحها، و  $V$  تمثل سرعة الطيران الأمامية للمنصة المسيرة.

توضح المعادلة (7) أن استهلاك القدرة في نظام المنصة المسيرة ذات الجناح الثابت يتكون من شقين: الأول يوضح نمط الاستهلاك اللازم لدفع مقاومة الهواء أثناء طيران المنصة المسيرة في وضع أفقي معتمداً ذلك على كثافة الهواء ومساحة سطح المسيرة وتزداد كمية الاستهلاك بازدياد السرعة الأمامية للطيران، والشق الثاني يمثل نمط الاستهلاك الحثي اللازم للإبقاء على المنصة المسيرة في وضع مستو بالجو حيث يقل هذا الاستهلاك بازدياد سرعة الطيران الأمامية. يبين الشكل (8) محاكاة كمية استهلاك القدرة في نظام منصة مسيرة ذات الجناح الثابت كدالة في سرعة الطيران الأمامية، حيث يلاحظ أن الاستهلاك يصل إلى ما لانهاية نظرياً عندما تكون السرعة الأمامية صفراً مما يدل على أن المنصة المسيرة ذات الجناح الثابت يجب أن تحافظ على الحد الأدنى من السرعة الأمامية لتبقى مستوية في الجو وقت توفير خدمة الاتصال، كما يلاحظ من نفس الشكل تساوي مقدار نمطي استهلاك القدرة لنظام المنصة المسيرة عند القيمة 0.56 كيلو وات وذلك لسرعة طيران أمامية مقدارها 40 متراً بالثانية.

تهدف نظم الاتصال بالمنصات المسيرة إلى الموازنة بين تقليل استهلاك القدرة وزيادة كفاءة استهلاك الطاقة، وتؤثر كمية القدرة اللازمة لتشغيل المنصة المسيرة في كفاءة استهلاك الطاقة والتي تعتبر معياراً مهماً في نظم اتصالات المنصات المحمولة جواً نظراً لارتباط العمر التشغيلي لبطاريات القدرة في المنصة الجوية بكمية الاستهلاك. تعرف كفاءة الطاقة على أنها نسبة إنتاجية النظام اللاسلكي من إجمالي الطاقة المستخدمة بما في ذلك طاقة التشغيل وقدرة إرسال البيانات وتقاس بالبت لكل جول، وتزداد الكفاءة كلما تحسنت شروط القناة من ناحية انخفاض تخميد الإشارة وارتفاع احتمالية الاتصال المباشر وأيضاً قلت طاقة تشغيل المنصة المسيرة (الطاقة المستهلكة)، وهذا يمكن توضيحه بالمعادلة (8) والاستعانة بمخطط الشكل (9) لنمذجة كفاءة الطاقة لمنصة مسيرة ذات الجناح الثابت كالآتي [9]:

$$\frac{EE(r)}{EE(r)} = \frac{\log_2 \left( 1 + \frac{\bar{\gamma}}{(h_A^2 + r^2)^{\alpha/2}} \right)}{c_3 \left( c_1 + \frac{c_2}{g_e^2 r^2} \right)^{1/4} + P_c} \quad (8)$$

حيث  $c_1$ ،  $c_2$  و  $c_3$  ثوابت تتعلق بكل من كثافة الهواء وطبيعة جسم المنصة المسيرة ذات الجناح الثابت من ناحية مساحة السطح والحجم،  $g_e$  عجلة الجاذبية الأرضية،  $\bar{\gamma}$  متوسط نسبة قدرة الإشارة المستقبلية إلى قدرة الضوضاء اعتماداً على قدرة الإرسال واحتمالات الاتصال عبر خط الرؤية المباشر،  $P_c$  هي قدرة الاستهلاك اللازمة لعمل المنصة المسيرة.

واستهلاك القدرة لنموذجين من المنصات المسيرة، وفيما يلي إيجاز لمخلص الدراسة:

- تعتبر زاوية الارتفاع بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية من المحددات المهمة التي تؤثر في جودة الأداء، نظرا لارتباط ذلك بإمكانية توفر خط رؤية مباشر بين طرفي التراسل والذي سيحدد أقصى مدى ممكن لتغطية المنصة المسيرة.
- تزداد كفاءة أداء نظام المنصة المسيرة بزيادة الارتفاع إلى قيم محددة وفقا لنموذج اعتمادية زاوية الارتفاع بسبب الاحتمالات المرتفعة لخط الرؤية، لكن بعد ذلك فإن زيادة الارتفاع سيكون لها تأثير سلبي نظرا لهيمنة تخميد الانتشار.
- ترتبط احتمالية توفر خط رؤية للاتصال المباشر بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية بارتفاع المنصة والمسافة الأفقية ثنائية البعد الفاصلة بين طرفي التراسل، حيث ترتفع احتمالية الاتصال المباشر بزيادة ارتفاع المنصة المسيرة وانخفاض المسافة الفاصلة مما يزيد من قيم زاوية الارتفاع.
- يعتبر استهلاك القدرة من التحديات التي تواجه عمل نظم المنصات المسيرة في مجال الاتصالات وتعتمد كمية الاستهلاك على طبيعة طيران المنصة المسيرة وبعض العوامل التقنية الأخرى.
- ترتفع كفاءة الطاقة في نظم المنصات المسيرة بتقليل قدرة الاستهلاك اللازمة لعمل المنصة المسيرة وأيضا بازدياد زاوية الارتفاع بين المنصة المسيرة وعقدتها الأرضية.
- يتكون استهلاك القدرة في المنصات المسيرة ذات الجناح الثابت من نمطين: حثي لمقاومة عجلة الجاذبية الأرضية ويتناسب عكسيا مع سرعة الطيران الأمامية للمنصة المسيرة، ونمط استهلاك آخر لمقاومة دفع الهواء ويتناسب طرديا مع مكعب سرعة الطيران الأمامية.
- يعتمد استهلاك القدرة في المنصات المسيرة ذات الجناح الدوار على ثلاث أنماط: نمطي استهلاك كما في مسيرات الجناح الثابت لمقاومة عجلة الجاذبية الأرضية ومقاومة دفع الهواء، ونمط استهلاك ثالث يخص ريشات الجناح الدوار والذي يتناسب طرديا مع مربع سرعة الطيران الأمامية للمنصة المسيرة.
- ستكون هناك دراسات أخرى يمكن تنفيذها استكمالاً لهذه المقالة ومنها ما يلي:
- محاكاة أداء استخدام المنصات المسيرة في تزويد اتصالات الجيل التالي كدالة في معدل الخطأ بالبيانات واحتمالية الانقطاع، ومن ثم استخدام التقنيات الحديثة في تحسين كفاءة الوصلة الراديوية.
- محاكاة استخدام المنصة المسيرة كنظام اتصال خلوي من خلال نماذج تشكيل الشعاع لنظام الهوائيات وتقييم الأداء من ناحية جودة الإشارة والكفاءة الطيفية للوصلة الراديوية.
- محاولة نمذجة القناة لنظام الاتصال بالمنصة المسيرة في بيئة انتشار محلية في ليبيا، وتبيان مدى جدواها في توفير خدمات الاتصالات مقارنة بنظم الاتصالات الأرضية.

## المراجع

- [1] Bin Li, Zesong, Fei and Yan Zhang, "UAV Communications for 5G and Beyond: Recent Advances and Future Trends," IEEE Internet of things journal, vol. 6, pp. 2241-2263, April 2019.
- [2] Yong Zeng, Qingqing Wu, and Rui Zhang, "Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond," IEEE invited paper, vol. 107, pp. 2327-2375, December 2019.
- [3] C. Liu, M. Ding, C. Ma, Q. Li, Z. Lin, and Y.-C. Liang, "Performance analysis for practical unmanned aerial vehicle networks with LoS/NLoS transmissions," in Proc. IEEE International Conference Communication. (ICC) workshop, pp. 1-6, May 2018.
- [4] J. Lyu and R. Zhang, "Network-connected UAV: 3D system modeling and coverage performance analysis," IEEE Internet of things journal, vol. 6, pp. 7048-7060, August 2019.

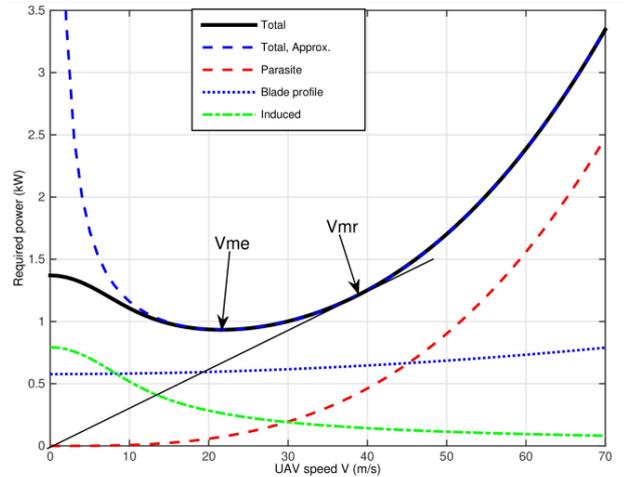
بافتراض مسيرة ذات جناح دوار تتحرك في وضع مستو على ارتفاع ثابت، فإن استهلاك القدرة في نظام المنصة المسيرة يعبر عنه كالتالي [8]:

$$P(V) = P_0 \underbrace{\left(1 + \frac{3V^2}{U_{tip}^2}\right)}_{blade} + P_{ind} \underbrace{\left(\sqrt{1 + \frac{V^4}{4v_0^4}} - \frac{V^2}{2v_0^2}\right)^{1/2}}_{induced} + \underbrace{\frac{1}{2} d_0 \rho s A V^3}_{parasite} \quad (9)$$

حيث  $P_0$  و  $P_{ind}$  ثوابت قدرة تعتمد على حجم المنصة المسيرة وكثافة الهواء وتبين كمية الاستهلاك في حالة وضع التحويم (عندما تكون سرعة الطيران الأمامية مساوية للصفر) للمنصة المسيرة ذات الجناح الدوار،  $U_{tip}$  تمثل سرعة دوران ريشات الجناح الدوار للمنصة المسيرة،  $V$  تبين سرعة الطيران الأمامية للمنصة المسيرة،  $v_0$  تشير إلى متوسط السرعة الحثية لمروحة الجناح الدوار للمنصة المسيرة أثناء وضع التحويم،  $A$  هي مساحة سطح الجناح الدوار،  $d_0$  و  $s$  ثوابت تتعلق بقوة السحب ومعامل الصلابة للجناح الدوار على الترتيب،  $\rho$  هي مقدار كثافة الهواء الجوي في منطقة طيران المنصة المسيرة.

يتكون نموذج استهلاك القدرة في المنصات المسيرة ذات الجناح الدوار وفقا للمعادلة (9) من ثلاث أنماط: الأول يصف نمط استهلاك مروحة الجناح الدوار والذي يتناسب عكسيا مع مربع سرعة دوران ريشات مروحة الجناح وطرديا مع مربع سرعة الطيران الأمامية للمنصة المسيرة، أما نمطي الاستهلاك الثاني والثالث كما في مسيرات الجناح الثابت فيمثلان على الترتيب كلا من نمط الاستهلاك الحثي اللازم للإبقاء على المنصة المسيرة في وضع مستو (وضع التحويم) بالجو مقاوما لتأثير عجلة الجاذبية الأرضية؛ ونمط استهلاك القدرة اللازم لدفع مقاومة الهواء والذي يتناسب طرديا مع مكعب سرعة الطيران الأمامية.

يوضح الشكل (11) محاكاة كمية القدرة المستهلكة في نظام المنصة المسيرة كدالة في سرعتها الأمامية حيث يلاحظ أن المنصات ذات الجناح الدوار يمكن أن تحوم بسرعة صفرية ثابتة باستهلاك محدد من القدرة، ويلاحظ من نفس الشكل أيضا تساوي نمطي الاستهلاك الحثي والاستهلاك اللازم لدفع الهواء عند القيمة 0.19 كيلو وات لسرعة طيران أمامية مقدارها 30 مترا بالثانية. كما يتبين أيضا من الشكل (11) وجود سرعتين عمليتين لهما تأثير فعال في نمط استهلاك القدرة هما سرعة التحميل القصوى ( $V_{me}$ ) وسرعة المدى القصوى (maximum-endurance) وتبين مدى السرعات الأمامية للمنصة المسيرة التي تزيد من مسافة تنقل المنصة المسيرة بأقل كمية استهلاك للقدرة، وسرعة المدى القصوى ( $V_{mr}$ ) وهي سرعة الطيران المماسية بحيث يزداد الاستهلاك الكلي للقدرة بعد هذه السرعة الأمامية بشكل مضطرد.



شكل 11. أنماط استهلاك القدرة في مسيرة ذات الجناح الدوار [8].

## 4. الخلاصة والتوصيات

قدمت هذه المقالة عرضاً لاستخدام المنصات المسيرة المحمولة جواً كتقنية في مجال الاتصالات اللاسلكية ومن ثم دراسة الأداء من خلال نمذجة كل من القناة

- [5] Mattia Rebato, Laura Resteghini , Christian Mazzucco, Michele Zorzi, “ *Study of Realistic Antenna Patterns in 5G mmWave Cellular Scenarios,*” IEEE ICC Communications QoS, Reliability, and Modeling Symposium (ICC18 CQRM), Kansas City, USA, May 2018
- [6] R. J. Kerczewski, J. D. Wilson, and W. D. Bishop, “*Frequency spectrum for integration of unmanned aircraft,*” in Proc. IEEE AIAA Digital Avionics Systems. Conference (DASC), pp. 6D5-1–6D5-9, October 2013.
- [7] G. Zhang, Q. Wu, M. Cui, and R. Zhang, “*Securing UAV communications via joint trajectory and power control,*” IEEE transaction wireless communication., vol. 18, pp. 1376–1389, February 2019.
- [8] Y. Zeng, J. Xu, and R. Zhang, “*Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV,*” IEEE Transaction Wireless Communication, vol. 18, pp. 2329–2345, April 2019.
- [9] Y. Zeng and R. Zhang, “*Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization,*” IEEE Transaction Wireless Communication., vol. 16, pp. 3747–3760, June 2017.
- [10] Chaoxing Yan, Lingang Fu, Jiankang Zhang, and Jingjing Wang, “*A comprehensive survey on UAV communication channel model,*” IEEE access, vol. 4, pp. 107769-107792, August 2019.
- [11] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, “*Optimal LAP altitude for maximum coverage,*” IEEE Wireless Communication Letters, vol. 3, pp. 569–572, December 2014.