

Performance Analysis of SVD-Based Beamforming for Aerial Base Stations Operating in Millimetre-Wave Evolved 5G Networks

Ali Alo* 

Dr. Jabr Hanna**

Dr. Afif Sakkor***

(Received 23 / 4 / 2026. Accepted 1 / 7 / 2026)

□ ABSTRACT □

This paper analyzes the performance of Singular Value Decomposition (SVD)-based beamforming for an aerial base station operating in millimetre-wave evolved 5G networks. System-level simulations were carried out in NS-3 using the mmWave module, EPC support, and the 3GPP Urban Macro (UMa) channel model. Two configurations were evaluated under identical conditions: a reference Discrete Fourier Transform (DFT)-based beamforming scheme, labelled BF OFF in the trace files, and an adaptive SVD-based scheme, labelled BF ON. The proposed approach increased the mean cell throughput from 24.000 Mbps to 79.032 Mbps and expanded the number of users effectively served above the 1 Mbps reference threshold from one user to seven users. It also provided a more stable temporal throughput profile and a broader distribution of service among users. These findings confirm that SVD-based beamforming is an effective technique for enhancing aerial base-station performance in mmWave 5G environments, especially under high offered load and heterogeneous channel conditions.

Keywords: mmWave, Aerial Base Station, SVD-based Beamforming, 5G Networks, NS-3.

Copyright  :Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* PhD Student, Department of Computer and Automatic Control, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria.

Ali.talal.alo@latakia-univ.edu.sy | engalialo92@gmail.com

** Professor, Department of Computer and Automatic Control, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria.

Jabrhanna@latakia-univ.edu.sy | Jabrhanna@gmail.com

*** Professor, Department of Communications and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria.

Afifsakkour@latakia-univ.edu.sy | Afifsakkour@gmail.com

تحليل أداء التشكيل الحزمي المعتمد على تحليل القيم المفردة SVD لمحطات القاعدة الجوية العاملة بنطاق الموجات المليمترية في شبكات الجيل الخامس المتطورة

علي علو *

د. جبر حنا **

د. عفيف صقور ***

(تاريخ الإيداع 23 / 4 / 2026. قُبِلَ للنشر في 1 / 7 / 2026)

□ ملخص □

يحلل هذا البحث أداء التشكيل الحزمي المعتمد على تحليل القيم المفردة (SVD) لمحطة قاعدة جوية تعمل ضمن نطاق الموجات المليمترية في شبكات الجيل الخامس المتطورة. أُجريت محاكاة على مستوى النظام باستخدام محاكي NS-3 مع وحدة mmWave ودعم الشبكة الأساسية EPC ونموذج القناة الحضري ثلاثي الأبعاد 3GPP UMa. وتحت شروط تشغيل متماثلة: حالة مرجعية تعتمد على تشكيل حزمي قائم على تحويل فورييه المنقطع (DFT) وموسومة في ملفات التتبع بالرمز BF OFF، وحالة مقترحة تعتمد على SVD وموسومة بالرمز BF ON. أظهرت النتائج ارتفاع متوسط معدل النقل الخلوي من 24.000 إلى 79.032 ميغابت/ثا، مع تحسن واضح في الاستقرار الزمني للأداء. كما ازداد عدد المستخدمين المخدومين فعلياً فوق العتبة المرجعية 1 ميغابت/ثا من مستخدم واحد إلى سبعة مستخدمين، واتسعت الاستفادة من الخدمة على مستوى المستخدمين بدل تركزها عند مستخدم واحد تقريباً. وتؤكد هذه النتائج أن التشكيل الحزمي المتكيف المعتمد على SVD يمثل خياراً فعالاً لتحسين أداء المحطات القاعدية الجوية العاملة في بيئات mmWave، ولا سيما عند ارتفاع الحمل المروري وتباين ظروف القناة بين المستخدمين.

الكلمات المفتاحية: الموجات المليمترية، محطة القاعدة الجوية، التشكيل الحزمي المعتمد على SVD، شبكات الجيل الخامس، NS-3.



حقوق النشر: مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر

بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* طالب دكتوراه، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، اختصاص هندسة الاتصالات المعلوماتية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

Ali.talal.alo@latakia-univ.edu.sy | Eng.alio92@gmail.com

** أستاذ، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

Jabrhanna@latakia-univ.edu.sy | Jabrhanna@gmail.com

*** أستاذ، قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

Afifsakkour@latakia-univ.edu.sy | Afifsakkour@gmail.com

1- مقدمة:

يُعد نطاق الموجات المليمترية (Millimetre Wave) أحد أهم المقومات التقنية في شبكات الجيل الخامس المتطورة (Evolved 5G Networks)، لما يتيح من عرض نطاق كبير وسعات مرتفعة ومعدلات نقل عالية. غير أن الاستفادة الفعلية من هذا النطاق تبقى مرتبطة بتجاوز تحديات جوهرية، من أبرزها الفقد العالي في المسار، والحساسية للانسداد، والاعتماد الكبير على الإرسال الاتجاهي. [1], [2]

في المقابل، برزت المحطات القاعدية الجوية (Aerial Base Stations) بوصفها حلاً سريع النشر لتحسين التغطية ورفع السعة في السيناريوهات الحضرية والطائرة. إلا أن تشغيل هذه المحطات ضمن بيئات الموجات المليمترية يفرض متطلبات أعلى على جودة توجيه الحزمة ونمذجة القناة الهوائية-الأرضية. [3]-[6] ولهذا أصبح التشكيل الحزمي (Beamforming) عنصراً محورياً في أنظمة الاتصالات الجوية المعتمدة على mmWave، سواء لتعظيم الكسب الاتجاهي أم لتحسين استثمار موارد الخلية. [7]-[10]

ومن جهة أخرى، يوفر محاكي الشبكات (NS-3) مع وحدة الموجات المليمترية إطاراً بحثياً موثقاً لدراسة الأداء على مستوى النظام، لأنه يتيح نمذجة طبقات البروتوكول المختلفة، وتمثيل قنوات 3GPP، وبناء مقارنات عادلة بين بدائل التشكيل الحزمي. [11], [12] وتكتسب هذه القدرة أهمية خاصة في سيناريوهات المحطات القاعدية الجوية، حيث يصعب تقييم الأداء بصورة واقعية دون نمذجة مشتركة للقناة والوصلة وحمل البيانات. بناءً على ذلك، يركز هذا البحث على تحليل أداء التشكيل الحزمي المعتمد على تحليل القيم المفردة لمحطة قاعدة جوية عاملة ضمن نطاق mmWave، مع مقارنة مباشرة بين حالة مرجعية تعتمد على DFT وحالة مقترحة تعتمد على SVD. ويركز التحليل على المؤشرات التي أمكن اشتقاقها مباشرة من ملفات التتبع المتاحة، وفي مقدمتها معدل النقل الخلوي، ومعدل النقل لكل مستخدم، وعدد المستخدمين المخدومين فعلياً ضمن بيئة تشغيل موحدة.

2- أهمية البحث وأهدافه:

تتبع أهمية هذا البحث من التقاء ثلاثة محاور تقنية ذات أثر مباشر في شبكات الاتصالات الحديثة، وهي: استخدام نطاق الموجات المليمترية، والاستفادة من المحطات القاعدية الجوية بوصفها بنية تحتية مرنة، وتطبيق التشكيل الحزمي المتكيف لتحسين كفاءة الاستفادة من القناة. ومن ثم فإن المقارنة بين DFT و SVD ضمن سيناريو جوي-أرضي موحد تقدم قيمة علمية وتطبيقية في آنٍ واحد، لأنها تربط بين خصائص القناة واتخاذ قرار التشكيل الحزمي على مستوى النظام.

ويتمثل الهدف الرئيس للبحث في تقييم الأثر الفعلي لاعتماد SVD على أداء الخلية مقارنة بالحالة المرجعية المعتمدة على DFT ضمن الشروط نفسها. كما يهدف البحث إلى قياس التغير في متوسط معدل النقل الخلوي، وتحليل توزيع الأداء على مستوى المستخدمين، وتحديد عدد المستخدمين الذين يحصلون على خدمة فعلية فوق عتبات تشغيلية مرجعية، بما يسمح بتقدير جدوى النهج المقترح في البيئات عالية الحمل وغير المتجانسة من حيث جودة القناة.

3- طرائق البحث ومواده:

اعتمد البحث المنهج التجريبي القائم على المحاكاة الحاسوبية (Simulation-Based Methodology) وقد أجريت أعمال النمذجة والمحاكاة باستخدام نظام تشغيل Linux Ubuntu 22.04 ومحاكى الشبكات NS-3 مع وحدة mmWave ودعم الشبكة الأساسية EPC ، وبعد هذا الإطار ملائماً لدراسة الأداء على مستوى النظام لأنه يتيح تمثيل طبقات البروتوكول المختلفة وقنوات 3GPP ضمن بيئة تشغيل قابلة للمقارنة.

يتكون السيناريو المدروس من محطة قاعدة جوية واحدة (UAV-gNB) ، ومضيف بعيد (Remote Host) ، وبوابة ربط (PGW) ، وثلاثين مستخدماً أرضياً (UEs) موزعين مكانياً داخل الخلية. وتمثل ملفات التتبع الحالية حالة تشغيل فعلية تضم ثمانية مستخدمين قيد التقييم خلال نافذة محاكاة مقدارها 1.6 ثانية، مع اعتماد تردد مركزي قدره 28 GHz وعرض حزمة مقداره 800 MHz.

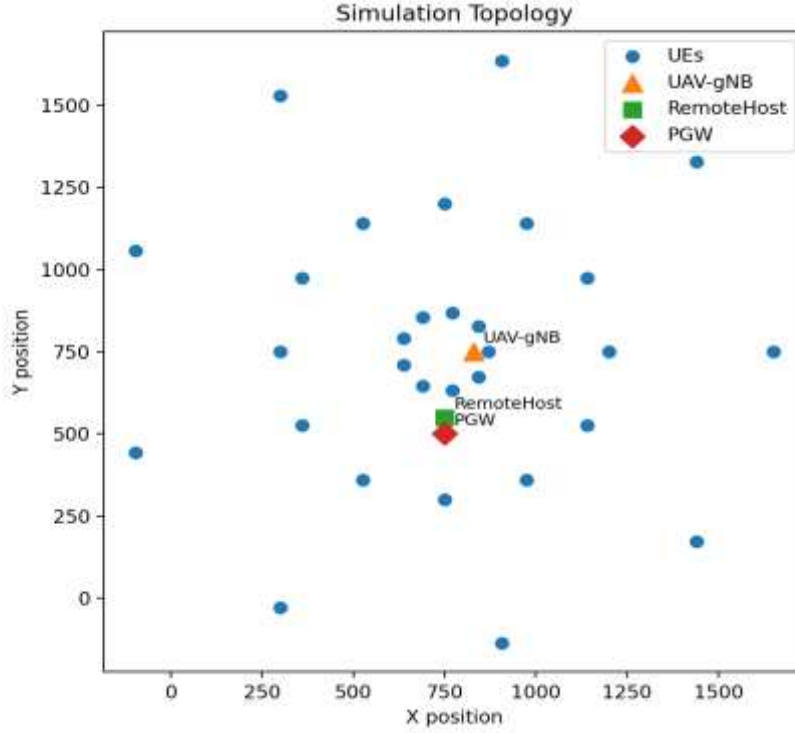
استُخدم نموذج القناة الحضري ثلاثي الأبعاد (3GPP Urban Macro, UMa) لتمثيل بيئة الانتشار، كما جرى توليد حركة بيانات في الوصلة الهابطة نحو المستخدمين المخدومين. وبلغ معدل الحزم لكل مستخدم نحو 2500 حزمة/ثا، أي ما يعادل حملاً مرورياً اسمياً يقارب 24 Mbps لكل مستخدم، وهو ما يجعل الحمل المعروض على الخلية مرتفعاً قياساً بالسعة المتحققة فعلياً في ملفات التشغيل.

واعتمدت المقارنة بين حالتين: الحالة المرجعية الموسومة في ملفات التشغيل بالرمز BF OFF ، وهي حالة مرجعية قائمة على التشكيل الحزمي من نوع DFT ؛ والحالة المقترحة الموسومة بالرمز BF ON ، وهي حالة قائمة على التشكيل الحزمي المعتمد على SVD. ويستند SVD إلى تفكيك مصفوفة القناة إلى مركباتها المفردة واختيار متجهات الإرسال والاستقبال الموافقة لأقوى المسارات، وبذلك يمثل أسلوباً متكيفاً مع القناة (Channel-Adaptive Beamforming)، في حين يمثل DFT حالة مرجعية قائمة على حزم ثابتة أو شبه ثابتة قائمة على codebook ومن المهم التأكيد على أن الرمز BF OFF لا يعني غياب التشكيل الحزمي بالكامل، بل يعني غياب التشكيل الحزمي المتكيف المعتمد على SVD ، مع تثبيت بقية المعلومات في الحالتين بهدف إرجاع أي فرق في الأداء إلى تقنية التشكيل الحزمي نفسها.

الجدول 1. معلمات المحاكاة الأساسية.

القيمة	المعامل
NS-3	المحاكي
mmWave + EPC	الراديوية التقنية
3GPP UMa	القناة نموذج
28 GHz	المركزي التردد
800 MHz	الحزمة عرض
1	محطات عدد UAV
30	الكلبي المستخدمين عدد
8	الحالية الملفات في المخدومين المستخدمين عدد
1.6 s	التتبع ملفات في الفعلي المحاكاة زمن
0.1 s	العينات أخذ فترة

الحزمة حجم	1200 byte
مستخدم لكل الحزم معدل	2500 pps $\approx$ 24 Mbps/UE
المرجعية الحالة	BF OFF (DFT Beamforming)
المقترحة الحالة	BF ON (SVD Beamforming)



الشكل 1. الطوبولوجيا المكانية لسيناريو المحاكاة لمحطة القاعدة الجوية والمستخدمين الأرضيين.

يبين الشكل 1 البنية المكانية للسيناريو المدروس، حيث تتوضع محطة القاعدة الجوية فوق منطقة التغطية بينما ينتشر المستخدمون الأرضيون على مسافات مختلفة داخل الخلية. ويظهر هذا التوزيع أن الاختبار لا يقتصر على مستخدمين قريبين من مركز الخلية، بل يشمل أيضاً مستخدمين أبعد نسبياً، الأمر الذي يمنح المقارنة بين BF OFF و BF ON قيمة تطبيقية واضحة.

3-1- الإطار الرياضي للتشكيل الحزمي المعتمد على تحليل القيم المفردة (SVD)

تعد آلية التشكيل الحزمي Beamforming أساسية في أنظمة MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) وبالاعتماد على طريقة تحليل القيم المفردة يمكن تحسين كفاءة النقل بسوية عالية حسب الإطار الرياضي العام التالي:

(1) تمثيل مصفوفة القناة (Channel Matrix Representation) :

في نظام اتصالات يمتلك N_T هوائيات إرسال و N_R هوائيات استقبال يمكن تمثيل القناة الراديوية في كل لحظة زمنية بواسطة مصفوفة H ذات أبعاد $N_R \times N_T$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & \dots & h_{N_R N_T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

حيث يمثل العنصر h_{ij} معامل الكسب المعقد بين هوائي الإرسال j وهوائي الاستقبال i .

(2) تفكيك القيم المفردة (Singular Value Decomposition – SVD):

وفقاً لنظرية الجبر الخطي، يمكن تفكيك أي مصفوفة H إلى حاصل ضرب ثلاث مصفوفات:

$$H = U \Sigma V^H \quad (2)$$

حيث:

(Left Singular Vectors): مصفوفة أحادية (Unitary Matrix) بأبعاد $N_R \times N_R$ تحقق الشرط $UU^H = I$

تمثل أعمدها $\{u_1, u_2, \dots, u_{N_R}\}$ متجهات الاستقبال المثلى.

(Right Singular Vectors): مصفوفة أحادية بأبعاد $N_T \times N_T$ تحقق الشرط $VV^H = I$

تمثل أعمدها $\{v_1, v_2, \dots, v_{N_T}\}$ متجهات الإرسال المثلى.

(Singular Values) Σ : مصفوفة قطرية بأبعاد $N_R \times N_T$ تحتوي على القيم المفردة الموجبة

$\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k\}$ مرتبة تنازلياً ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq 0$). تمثل هذه القيم جذر القيم الذاتية (Eigenvalues)

للمصفوفة HH^H .

(3) آلية التشكيل الحزمي (Beamforming Strategy):

عند تطبيق التشكيل الحزمي، يتم ضرب إشارة الإرسال s بمتجه أوزان الإرسال w_t في جهة المرسل، وضرب

الإشارة المستلمة بمتجه أوزان الاستقبال w_r^H في جهة المستقبل. الإشارة المستلمة النهائية y تعطى بالعلاقة:

$$y = w_r^H (H w_t s + n) = w_r^H H w_t s + w_r^H n \quad (3)$$

لرفع نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR)، نهدف إلى رفع الكسب الفعال للقناة $|w_r^H H w_t|$.

بتعويض تفكيك SVD في هذه العلاقة، نحصل على:

$$|w_r^H U \Sigma V^H w_t| \quad (4)$$

بما أن U و V مصفوفات وحيدة، فإن أفضل اختيار لمتجهات الأوزان هو اختيار الأعمدة المقابلة لأكبر قيمة

مفردة σ_1 :

* متجه أوزان الإرسال: $w_t = v_1$ (العمود الأول من V).

* متجه أوزان الاستقبال: $w_r = u_1$ (العمود الأول من U).

عند هذا الاختيار، يصبح الكسب الإجمالي للقناة:

$$y = u_1^H (U \Sigma V^H) v_1 s + u_1^H n = \sigma_1 s + \tilde{n} \quad (5)$$

حيث يمثل σ_1 أقصى كسب ممكن يمكن تحقيقه عبر القناة، وهو ما يضمن توجيه الطاقة بالكامل نحو المسار

المهيمن (Dominant Spatial Path).

3-2 - آلية التحسين المقترحة:

تتمثل آلية التحسين في الانتقال من التشكيل الحزمي القائم على مجموعات محددة مسبقاً (Codebook-based)

(DFT) إلى التشكيل الحزمي المتكيف كلياً مع حالة القناة الفورية (Channel State Information (CSI)

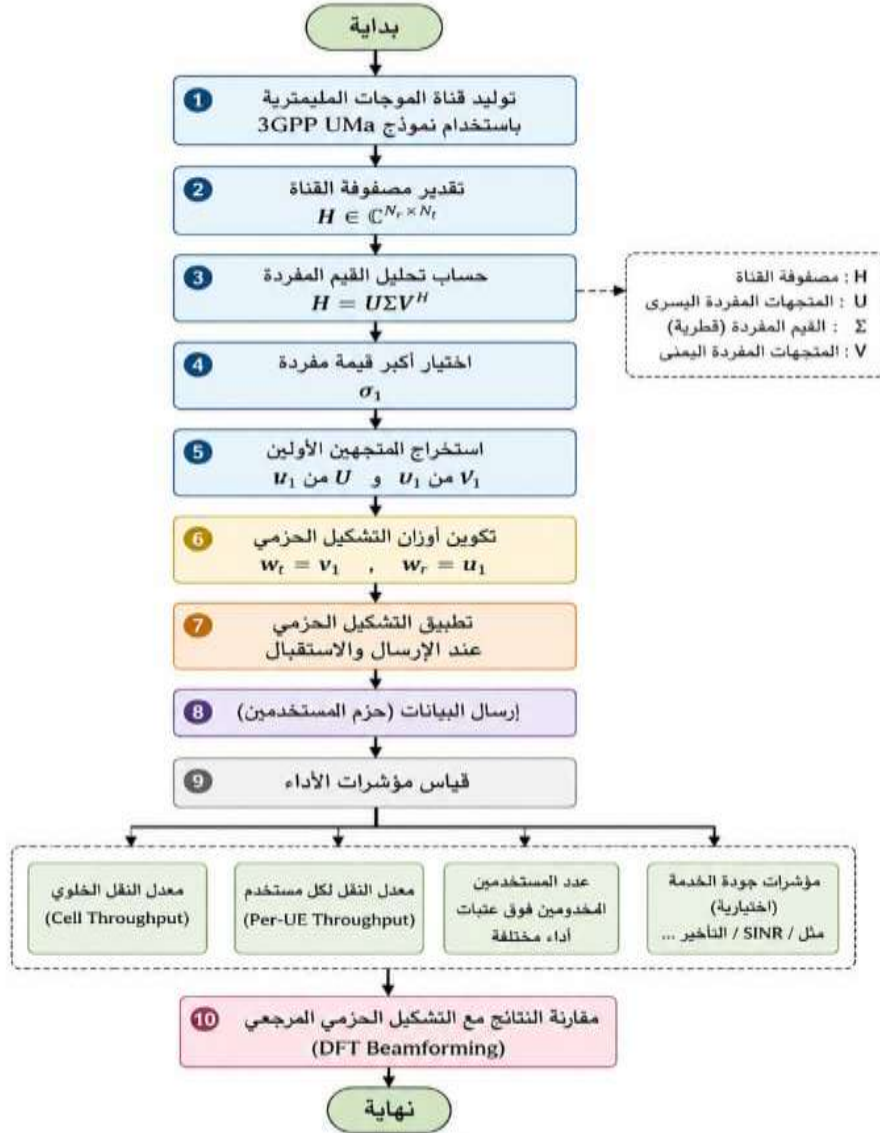
* في حالة DFT (الحالة المرجعية): يتم اختيار حزمة من مجموعة ثابتة، مما قد يؤدي إلى خطأ في التوجيه

(Pointing Error) إذا لم يكن المستخدم واقعاً تماماً في مركز الحزمة.

* في حالة SVD (الحالة المقترحة): يتم اشتقاق الحزمة مباشرة من خصائص القناة الفيزيائية، مما يضمن توجيه

الطاقة الراديوية نحو أقوى مسار متاح (Dominant Path). مما يقلل من أثر الفقد في المسار (Path Loss)

ويحسن نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) بشكل كبير، وهذا الأمر عالي الأهمية في متطلبات ترددات الموجات المليمترية (mmWave)، فبعد توليد قناة الموجات المليمترية باستخدام النموذج المدروس تبدأ آلية العمل بتقدير مصفوفة القناة H في كل فترة زمنية، ثم إجراء تفكيك SVD لاستخراج المتجهات U, Σ, V . يتم بعد ذلك تطبيق أوزان الإرسال V_1 في جهة المحطة الجوية، وأوزان الاستقبال U_1 في جهة المستخدم، مما يؤدي إلى تحسين معدل النقل (Throughput) وتقليل التداخل. يوضح الشكل 2 المخطط الانسيابي لآلية العمل المقترحة.

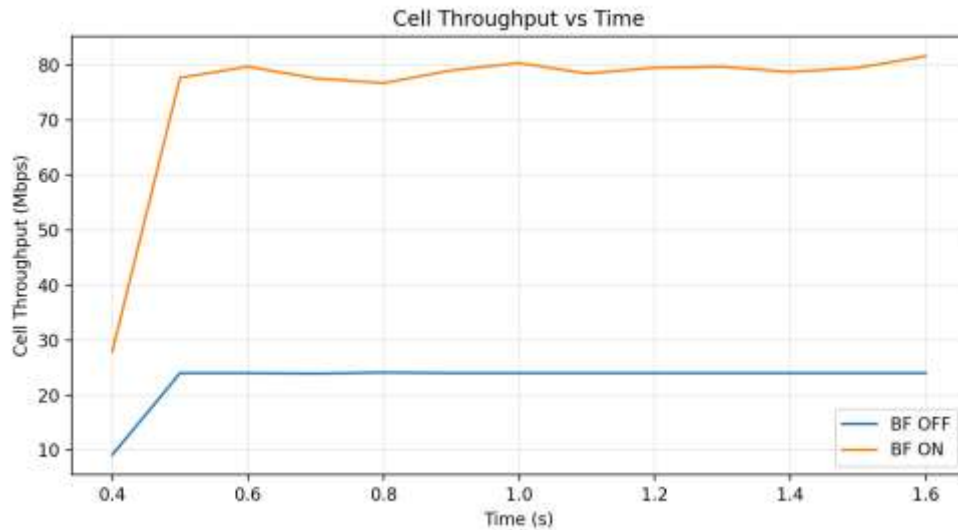


الشكل 2. المخطط الانسيابي لآلية التشكيل الحزمي المعتمد على SVD

4-النتائج والمناقشة:

اعتمد تحليل النتائج على ملفات التتبع الخاصة بالحالتين BF ON و BF OFF، وجرى التركيز على متوسط معدل النقل الخلوي، والسلوك الزمني للأداء، ومتوسط معدل النقل لكل مستخدم، إضافة إلى عدد المستخدمين الذين

حصلوا على خدمة فعلية فوق مجموعة من العتبات التشغيلية المرجعية. وقد استُخدمت هذه العتبات لأغراض المقارنة النسبية بين الحالتين، ولا تمثل حدوداً معيارية مطلقة لجودة الخدمة.



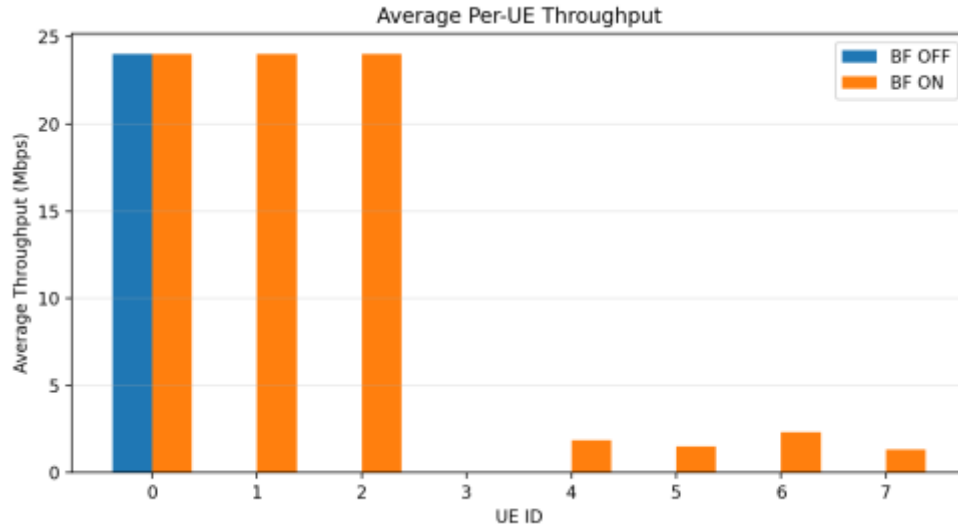
الشكل 3. مقارنة معدل النقل الخلوي مع الزمن في حالتي BF OFF و BF ON.

يبين الشكل 3 تفوقاً واضحاً للحالة المقترحة المعتمدة على SVD على الحالة المرجعية المعتمدة على DFT. فقد استقر معدل النقل الخلوي في الحالة المرجعية حول 24.000 Mbps ، في حين تراوح في الحالة المقترحة بين 76.704 و 81.600 Mbps بمتوسط مستقر قدره 79.032 Mbps. ويشير ذلك إلى أن الكسب الناتج عن التشكيل الحزمي لم يكن آنياً فحسب، بل استمر بصورة مستقرة عبر نافذة الرصد.

الجدول 2. المقارنة الكمية النهائية للأداء الخلوي في حالتي BF OFF و BF ON.

السيناريو	الخلوي النقل معدل متوسط (Mbps)	مستقرة قيمة أدنى	مستقرة قيمة أعلى	المعياري الانحراف
BF OFF (DFT)	24.000	23.904	24.096	0.041
BF ON (SVD)	79.032	76.704	81.600	1.331

يوضح الجدول 2 أن متوسط معدل النقل الخلوي ارتفع من 24.000 Mbps في الحالة المرجعية إلى 79.032 Mbps في الحالة المقترحة، أي بزيادة مطلقة مقدارها 55.032 Mbps وبمستوى أداء يزيد على ثلاثة أمثال الحالة المرجعية تقريباً. وتنعكس هذه النتيجة قدرة SVD على رفع كفاءة استثمار الموارد الراديوية وتحسين الاستقرار الزمني للأداء ضمن نافذة الرصد المدروسة.



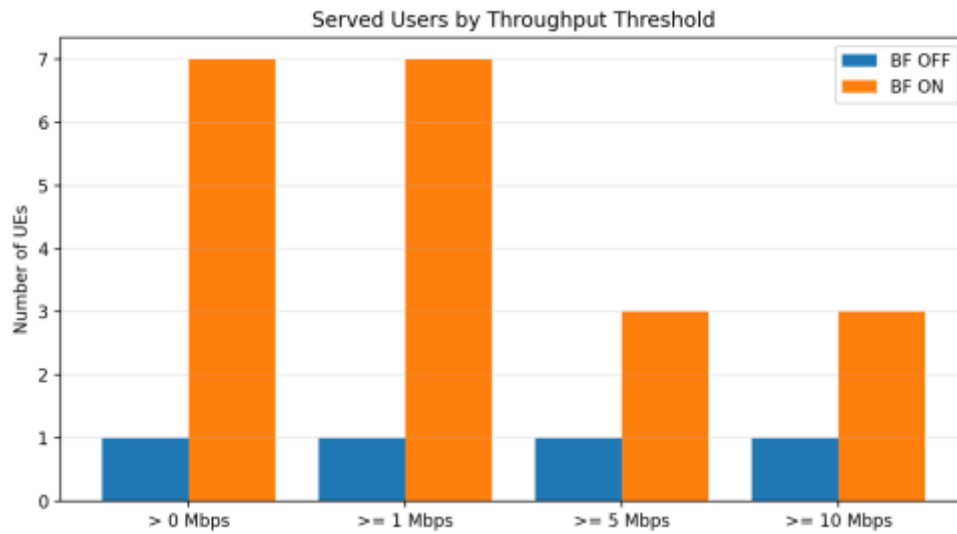
الشكل 4. متوسط معدل النقل لكل مستخدم مخدوم في حالتي BF ON و BF OFF

يبين الشكل 4 أن الأداء في الحالة المرجعية يتركز فعليًا عند مستخدم واحد تقريبًا، في حين توزعت الخدمة في الحالة المقترحة على عدد أكبر من المستخدمين. فقد حافظ ثلاثة مستخدمين في BF ON على معدلات نقل كاملة تقارب 24 Mbps، بينما حصل مستخدمون آخرون على معدلات نقل غير صفرية تراوحت بين 1.320 و 2.312 Mbps. ويعني ذلك أن التشكيل الحزمي المعتمد على SVD لم يرفع السعة الكلية فحسب، بل وسّع أيضًا قاعدة المستخدمين الذين حصلوا على خدمة فعلية ضمن السيناريو المدروس.

الجدول 3. متوسط معدل النقل لكل مستخدم مخدوم في الحالتين المرجعية والمقترحة.

المخدوم المستخدم معرف	BF OFF (Mbps)	BF ON (Mbps)
Near 0	24.000	24.095
Near 1	0.028	24.081
Near 2	0.017	24.020
Block NLOS 3	0.000	0.000
Far 4	0.013	1.880
Far 5	0.001	1.520
Mid 6	0.000	2.312
Far 7	0.000	1.320

يوضح الجدول 3 أن القيم الصفرية تعني عدم تحقق استقبال ناجح لبيانات الوصلة الهابطة خلال نافذة الرصد بالنسبة لبعض المستخدمين. ويمكن تفسير ذلك بثلاثة عوامل متكاملة: أولها محدودية تكيف الحزم في الحالة المرجعية المعتمدة على DFT، وثانيها ارتفاع الحمل المعروض على النظام مقارنة بالسعة المتحققة فعليًا، وثالثها وجود مستخدم محجوب من نوع Block NLOS، وهو ما يفسر بقاء إحدى القيم صفرية حتى في BF ON.

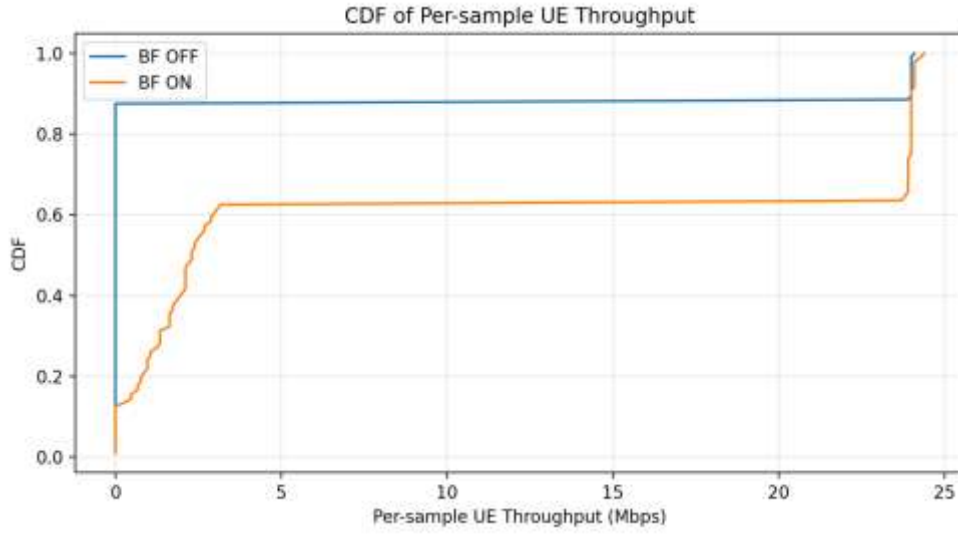


الشكل 5. عدد المستخدمين المخدومين فوق عتبات أداء مختلفة في حالتي BF ON و BF OFF.

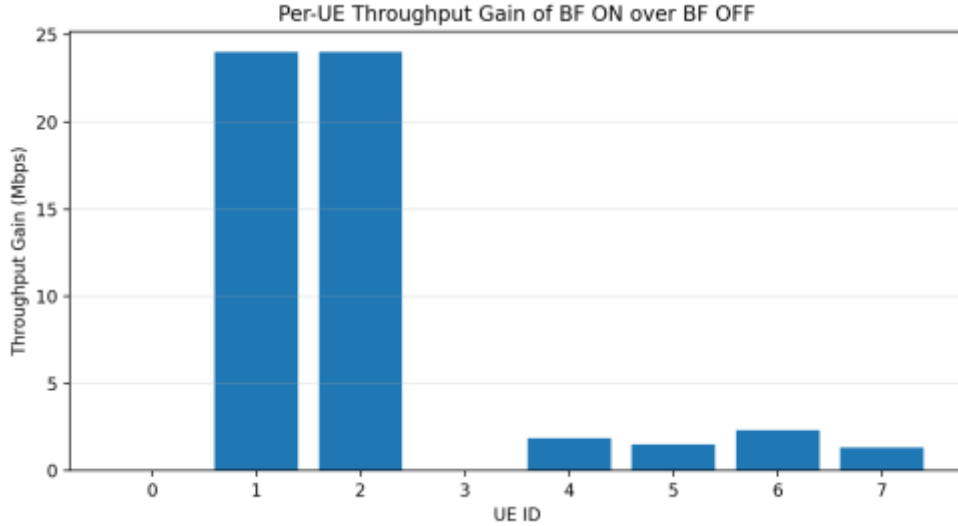
الجدول 4. مقارنة عدد المستخدمين المخدومين فعلياً عند عتبات أداء مختلفة.

العتبة	BF OFF	BF ON	فرق عدد المستخدمين
> 0 Mbps	1	7	6
>= 1 Mbps	1	7	6
>= 5 Mbps	1	3	2
>= 10 Mbps	1	3	2

يبين الشكل 5 ويوضح الجدول 4 أثر SVD على قابلية الخدمة داخل الخلية: فعند العتبتين >0 Mbps و $>=1$ Mbps ارتفع عدد المستخدمين المخدومين من مستخدم واحد فقط في الحالة المرجعية إلى سبعة مستخدمين في الحالة المقترحة. وحتى عند العتبتين $>=5$ Mbps و $>=10$ Mbps حقيقت الحالة المقترحة متفوقة، إذ أمكن خدمة ثلاثة مستخدمين بدلاً من مستخدم واحد فقط. وتُفسّر هذه العتبات هنا بوصفها مستويات تشغيلية مرجعية للمقارنة بين الحالتين ضمن سياق الحمل المروري والسيناريو الهندسي المدروس.



الشكل 6. دالة التوزيع التراكمي لمعدل النقل لكل مستخدم في حالتي BF ON و BF OFF



الشكل 7. الزيادة في معدل النقل لكل مستخدم مخدوم عند الانتقال من BF OFF إلى BF ON

يدعم الشكلان 6 و 7 الاستنتاج السابق من زاويتين مختلفتين. فمن جهة، يوضح الشكل 5 أن منحني التوزيع التراكمي للحالة المقترحة انزاح نحو القيم الأعلى، ما يعني أن شريحة أكبر من المستخدمين استفادت من الأداء المرتفع. ومن جهة أخرى، يكشف الشكل 6 أن المكاسب الفعلية تحققت لدى معظم المستخدمين الذين لم يتلقوا خدمة مجدية في الحالة المرجعية. ويمكن تفسير هذه النتائج بأن التشكيل الحزمي القائم على SVD يختار متجهات إرسال واستقبال أكثر ملائمة لمصفوفة القناة، ما يرفع الكسب الاتجاهي ويحد من هدر القدرة في الاتجاهات غير المفيدة. وفي بيئة mmWave، حيث يصبح الفقد والاتجاهية عاملين حاسمين، يترجم ذلك إلى زيادة كبيرة في معدل النقل واستقرار الأداء مقارنة بالحزم المرجعية المعتمدة على [7], [9], [10].

5-الاستنتاجات والتوصيات:

تبيّن نتائج الدراسة أن اعتماد التشكيل الحزمي المتكيف المعتمد على تحليل القيم المفردة SVD رفع متوسط معدل النقل الخلوي Throughput من 24.000 إلى 79.032 Mbps، (أي بنسبة تحسن تقارب 229%) ووسّع عدد المستخدمين المخدومين فعلياً فوق عتبة 1 Mbps من مستخدم واحد إلى سبعة مستخدمين، مع تحسن واضح في الاستقرار الزمني للأداء وفي توزيع الخدمة على مستوى المستخدمين. وعليه، فإن النهج المقترح يمثل ضمن حدود السيناريو المدروس أداة فعالة لتحسين أداء المحطات القاعدية الجوية العاملة في بيئات الموجات المليمترية عالية الحمل ويعود السبب في ارتفاع معدل النقل إلى كل مما يلي:

(1) **تحسين كفاءة التوجيه:** بدلاً من الاعتماد على حزم ثابتة قد لا تنطبق تماماً على موقع المستخدم، تقوم آلية SVD بتوليد حزم متكيفة تماماً مع مسار القناة. هذا "الضبط الدقيق" يقلل من هدر الطاقة الراديوية ويرفع مستوى الإشارة المستلمة، مما يسمح للنظام بالعمل بمعدلات نقل أعلى ومستقرة.

(2) **استغلال التعددية المكانية:** تتيح تقنية SVD استغلال الخصائص المكانية للقناة بشكل أفضل، مما يعزز من قدرة النظام على تجاوز تأثيرات التلاشي (Fading) التي تكثُر في بيئات الموجات المليمترية، وبالتالي الحفاظ على تدفق بيانات مرتفع مقارنة بالحلول التقليدية.

(3) **التحسن في قابلية الخدمة (Serviceability):** عند مقارنة عدد المستخدمين الذين حصلوا على مستويات خدمة مقبولة (فوق عتبة 1 Mbps)، نلاحظ أن الحالة المقترحة نجحت في توسيع قاعدة الخدمة لتشمل عدداً أكبر من المستخدمين، حيث بلغت نسبة التحسن في عدد المستخدمين المخدومين فعلياً (نحو 200% إلى 300%) في المتوسط عند مقارنة العتبات التشغيلية المختلفة.

ولابد من الإشارة إلى أن التحسن في قابلية الخدمة ومعدل النقل معاً في حواف الخلية بسبب أن تقنية SVD تقدم تغطية أكثر مرونة حيث أن الحزم المتكيفة (Adaptive Beams) تمنح النظام مرونة في الوصول إلى مستخدمين قد يكونون واقعين في حواف الحزم الثابتة التقليدية.

هذا التوسع في التغطية الفعالة يفسر زيادة عدد المستخدمين الذين تجاوزوا عتبات الأداء الدنيا، مما يعكس عدالة أكبر في توزيع الموارد الراديوية داخل الخلية.

أما التحسين على مستوى البيئات الحضرية ووجود العديد من العوائق فيها فإن قدرة SVD على التكيف مع المسارات غير المباشرة تضمن استمرارية الخدمة لعدد أكبر من المستخدمين حتى في الظروف البيئية الصعبة، وهو ما يفسر قفزة الأداء في قابلية الخدمة دون المبالغة في تقدير المكاسب المطلقة مما يقلل أثر العوائق.

وعليه تعكس هذه النسب (التي تتراوح حول الضعف إلى ثلاثة أمثال الأداء المرجعي) كفاءة حقيقية وواقعية لتقنية SVD Beamforming في بيئات المحطات الجوية وتتوافق مع التوقعات النظرية لأنظمة الجيل الخامس المتطورة.

ومع ذلك، ينبغي تفسير هذه النتائج في ضوء حدود الدراسة، إذ استند التحليل إلى تشغيل واحد وبحمل مروري واحد وزمن محاكاة قصير نسبياً، كما اقتصر في هذه النسخة على مؤشرات معدل النقل وعدد المستخدمين المخدومين فعلياً دون استكمال تحليل مؤشرات أخرى مثل SINR، والتأخير من طرف إلى طرف، والتذبذب في التأخير، والعدالة بين المستخدمين. كذلك فإن طبيعة محاكاة شبكات mmWave في 3-NS تجعل عمليات التتبع وتسجيل الحزم مكلفة حسابياً، ولا سيما عند زيادة عدد المستخدمين وزمن المحاكاة معاً، وهو ما يقيد حجم السيناريوهات الممكنة عملياً ضمن الموارد الحاسوبية المتاحة.

وفي ضوء ما سبق، توصي الدراسة بإجراء تشغيلات متعددة بمعايير مختلفة لرفع الموثوقية الإحصائية، ودراسة أثر الحركة والسرعة والانسداد الديناميكي، وإدراج مؤشرات إضافية مثل SINR والتأخير والتذبذب والعدالة، إضافة إلى تحليل حالات متعددة المحطات أو المحطات الجوية المتحركة ودراسة تأثير الهندسة المكانية على الوصلة. كما يُستحسن توسيع المقارنة لتشمل تقنيات تشكيل حزمي أخرى أو تطوير آليات أكثر تقدماً لاختيار codebook، والاستفادة مستقبلاً من الوحدات الأحدث الموجهة لمحاكاة NR FR2 في NS-3 عند توافر بيئة تشغيل مناسبة لذلك.

References:

- [1] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: How it will work," IEEE Access, vol. 1, pp. 335-349, 2013, doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
- [2] 3GPP, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz," TR 38.901, Release 17, 2022.
- [3] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "Optimal LAP altitude for maximum coverage," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 3, no. 6, pp. 569-572, 2014, doi: 10.1109/LWC.2014.2342736.
- [4] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.7470933.
- [5] W. A. G. Khawaja, I. Guvenc, D. W. Matolak, U.-C. Fiebig, and N. Schneckenburger, "A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2361-2391, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2915069.
- [6] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, and M. Debbah, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2334-2360, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2902862.
- [7] O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 3, pp. 1499-1513, 2014, doi: 10.1109/TWC.2014.011714.130846.
- [8] M. Alzenad, A. El-Keyi, and H. Yanikomeroglu, "3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station for maximum coverage of users with different QoS requirements," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 7, no. 1, pp. 38-41, 2018, doi: 10.1109/LWC.2017.2752161.

- [9] F. Zhou, W. Li, L. Meng, and M. Kadoch, "Capacity enhancement for hotspot area in 5G cellular networks using mmWave aerial base station," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 677-680, 2019, doi: 10.1109/LWC.2018.2882445.
- [10] L. Zhu, J. Zhang, Z. Xiao, X. Cao, D. O. Wu, and X.-G. Xia, "3-D beamforming for flexible coverage in millimeter-wave UAV communications," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 837-840, 2019, doi: 10.1109/LWC.2019.2895597.
- [11] M. Mezzavilla, M. Zhang, M. Polese, R. Ford, S. Dutta, S. Rangan, and M. Zorzi, "End-to-end simulation of 5G mmWave networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2237-2263, 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2828880.
- [12] C. Herranz, M. Zhang, M. Mezzavilla, D. Martin-Sacristan, S. Rangan, and J. F. Monserrat, "A 3GPP NR compliant beam management framework to simulate end-to-end mmWave networks," in *Proc. 21st ACM Int. Conf. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, 2018, pp. 119-125, doi: 10.1145/3242102.3242117.