

UavNetSim-v1: یک سکوی شبیه‌سازی مبتنی بر پایتون برای شبکه‌های مخابراتی پهپادها

Kai-kit Wong Jie Tang, Youjun Xiang, Cui Yang, Linyi Huang, Zipeng Dai, Zihao Zhou

چکیده (Abstract)

در شبکه‌های پهپادهای بدون سرنشین (UAV)، پروتکل‌ها و الگوریتم‌های ارتباطی نقش اساسی در همکاری و هماهنگی میان پهپادها ایفا می‌کنند. شبیه‌سازی، راهکاری مقرون‌به‌صرفه برای نمونه‌سازی، اشکال‌زدایی و تحلیل پروتکل‌ها و الگوریتم‌ها فراهم می‌کند و از هزینه‌های بسیار بالای آزمایش‌های میدانی جلوگیری می‌نماید.

در این مقاله، سکوی شبیه‌سازی متن‌باز UavNetSim-v1 معرفی می‌شود که یک چارچوب شبیه‌سازی مبتنی بر زبان پایتون برای توسعه سریع، آزمایش و ارزیابی پروتکل‌ها و الگوریتم‌ها در شبکه‌های پهپادی است. این پلتفرم اغلب قابلیت‌های مورد نیاز توسعه‌دهندگان، از جمله پروتکل‌های مسیریابی، کنترل دسترسی به رسانه (MAC)، الگوریتم‌های کنترل توپولوژی و مدل‌های تحرک و مصرف انرژی را فراهم می‌کند و در عین حال سادگی استفاده را حفظ می‌نماید.

علاوه بر این، این سکوی شبیه‌سازی از ارزیابی جامع عملکرد شبکه پشتیبانی کرده و دارای رابط بصری تعاملی برای تحلیل عمیق رفتار الگوریتم‌ها است. به‌طور خلاصه، UavNetSim-v1 هم برای نمونه‌سازی سریع و هم برای اهداف آموزشی بسیار مناسب بوده و می‌تواند به‌عنوان جایگزینی سبک، اما توانمند، برای شبیه‌سازهای بالغ شبکه در تحقیقات ارتباطات پهپادی مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی:

شبکه پهپاد، ارتباطات بی‌سیم، شبیه‌ساز، پایتون، SimPy

1. مقدمه (Introduction)

شبکه‌های پهپادهای بدون سرنشین در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را از سوی محققان دانشگاهی و صنعت به خود جلب کرده‌اند و نقش فزاینده‌ای در کاربردهای متنوعی نظیر امداد و نجات پس از بلایای طبیعی، شناسایی مشارکتی و پایش ترافیک ایفا می‌کنند. اجرای وظایف پیچیده در این شبکه‌ها مستلزم ارتباط و همکاری مؤثر میان پهپادها است که این امر به طراحی مناسب پروتکل‌های شبکه (مانند پروتکل‌های مسیریابی و MAC) و الگوریتم‌های کنترلی (مانند الگوریتم‌های کنترل حرکت و تخصیص منابع) وابسته است.

در روش‌های رایج پژوهشی، نمونه‌های اولیه پروتکل‌ها و الگوریتم‌های شبکه‌های پهپادی معمولاً نیازمند اعتبارسنجی مبتنی بر شبیه‌سازی هستند، زیرا پیاده‌سازی و آزمایش‌های واقعی هزینه‌بر بوده و اغلب غیرعملی می‌باشند. علاوه بر هزینه، شبیه‌سازی در

مقایسه با پیاده‌سازی واقعی، فرآیند طراحی، تنظیم پارامترها، اشکال‌زدایی و تحلیل عملکرد را ساده‌تر کرده و امکان تکرارپذیری نتایج تحت شرایط مختلف را فراهم می‌سازد.

با وجود توسعه چندین چارچوب متن‌باز برای شبیه‌سازی پهپادها، اغلب این شبیه‌سازها بر دقت شبیه‌سازی یک پهپاد منفرد تمرکز داشته و قادر به پشتیبانی از شبیه‌سازی بلادرنگ سیستم‌های چندپهپادی بزرگ‌مقیاس نیستند؛ از این‌رو برای مطالعات شبکه‌های مخابراتی پهپادی مناسب نمی‌باشند.

از سوی دیگر، شبیه‌سازهای شناخته‌شده شبکه‌های بی‌سیم مانند NS-2، NS-3، OMNeT++ و GloMoSim به دلیل پیچیدگی مفهومی بالا و منحنی یادگیری تند، برای نمونه‌سازی سریع و اهداف آموزشی مناسب نیستند. در چنین شرایطی، زمان و تلاش موردنیاز برای تسلط بر این ابزارها اغلب بیش از منافع حاصل از آن‌ها است.

بر این اساس، در این مقاله سکوی شبیه‌سازی جدید UavNetSim-v1 ارائه می‌شود که به‌طور کامل با زبان پایتون توسعه یافته و با تمرکز بر سادگی، توسعه‌پذیری و اهداف آموزشی طراحی شده است. این پلتفرم امکان طراحی و ارزیابی پروتکل‌های مسیریابی، MAC و کنترل توپولوژی را فراهم کرده و از ارزیابی عملکرد جامع و تحلیل بصری تعاملی پشتیبانی می‌کند.

III. اهداف طراحی و ویژگی‌های کلیدی (Design Goals and Key Features)

هدف اصلی طراحی UavNetSim-v1، ارائه شبیه‌سازی با کاربری آسان و قابلیت توسعه بالا، در عین حفظ دقت قابل قبول شبیه‌سازی است. ویژگی‌های کلیدی این پلتفرم عبارت‌اند از:

- متن‌باز: پروژه UavNetSim-v1 بر اساس توسعه جامعه‌محور متن‌باز طراحی شده است.
- مبتنی بر پایتون: استفاده از زبان پایتون باعث کاهش چشمگیر منحنی یادگیری می‌شود.
- ساده و انعطاف‌پذیر: قابلیت استفاده و توسعه برای سناریوهای مختلف مانند FANET و شبکه‌های یکپارچه زمین-هوا-فضا.
- دارای قابلیت بصری‌سازی: نمایش مسیر پرواز پهپادها و مسیر ارسال بسته‌ها برای تحلیل شهودی.
- پشتیبانی از هوش مصنوعی: امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی و یادگیری ماشین.
- پشتیبانی از تحلیل عملکرد: شامل شاخص‌هایی مانند نسبت تحویل بسته، تأخیر انتها به انتها، توان عملیاتی، سربار مسیریابی و تعداد پرش‌ها.

III. معماری و مروری بر ماژول‌ها (Architecture and Modules Overview)

پلتفرم UavNetSim-v1 بر اساس چارچوب شبیه‌سازی رویدادگسسته SimPy توسعه یافته است. عناصر اصلی SimPy شامل محیط شبیه‌سازی، رویدادها و توابع فرایندی تعریف‌شده توسط کاربر هستند. این ساختار، SimPy را برای سیستم‌های ارتباطی ناهمگام و چندعاملی بسیار مناسب می‌سازد.

در این پلتفرم، کلاس Drone نماینده هر پهپاد بوده و شامل پشته پروتکل مسیریابی، (MAC، مدل تحرک و مدل مصرف انرژی است. بسته‌های داده پس از تولید، بر اساس پروتکل مسیریابی، گره بعدی را انتخاب کرده و طبق قوانین MAC روی کانال بی‌سیم ارسال می‌شوند.

A. ماژول ارزیابی عملکرد (Performance Evaluation Module)

این ماژول از شاخص‌های زیر پشتیبانی می‌کند:

- نسبت تحویل بسته (PDR)
- تأخیر متوسط انتها به انتها (E2E Delay)
- توان عملیاتی متوسط (Throughput)
- سربار مسیریابی (Routing Load)
- تعداد پرش‌ها (Hop Count)

B. بسته پروتکل‌های مسیریابی (Routing Protocol Package)

پروتکل‌های پشتیبانی‌شده شامل DSDV ، Greedy Forwarding ، OPAR ، Q-Routing و QGeo هستند. هر پروتکل شامل توابع انتخاب گره بعدی و پردازش بسته دریافتی است.

C. بسته پروتکل MAC

پروتکل‌های CSMA/CA و ALOHA پیاده‌سازی شده‌اند. فرآیند ارسال، انتظار برای ACK و ارسال مجدد در این بخش مدیریت می‌شود.

D. بسته تحرک (Mobility Package)

مدل‌های تحرک شامل Gauss-Markov سه‌بعدی، Random Walk و Random Waypoint هستند که موقعیت، سرعت و جهت پهپاد را به‌صورت دوره‌ای به‌روزرسانی می‌کنند.

E. کنترل توپولوژی (Topology Control Package)

الگوریتم‌های کنترل توپولوژی مبتنی بر نیروی مجازی برای افزایش اتصال‌پذیری شبکه پشتیبانی می‌شوند.

F. ماژول مصرف انرژی (Energy Consumption Module)

مصرف انرژی شامل انرژی پیشران و انرژی ارتباطی است که با استفاده از مدل‌های تحلیلی معتبر محاسبه می‌شود.

IV. توسعه‌های آینده شبیه‌ساز (Simulator Extensions)

پیشنهادهایی مانند پشتیبانی از انواع گره‌های جدید، الگوهای ترافیکی واقعی‌تر، ملاحظات امنیتی و مدل‌های دقیق‌تر مصرف انرژی ارائه شده‌اند.

V. نتیجه‌گیری (Conclusions)

در این مقاله، سکوی شبیه‌سازی UavNetSim-v1 به‌عنوان یک ابزار ساده، منعطف و قدرتمند برای مطالعه شبکه‌های مخابراتی پهپادی معرفی شد. این پلتفرم با حفظ سادگی، امکانات کلیدی شبیه‌سازی، ارزیابی عملکرد و تحلیل بصری را فراهم می‌کند و جایگزینی مناسب برای شبیه‌سازهای پیچیده موجود محسوب می‌شود.
