

تشخیص و مکانیابی تقویت‌کننده‌های غیرمجاز در شبکه‌های سلولی مبتنی بر تحلیل آماری مقاوم داده‌های Drive Test

Drive Test

محمدحسین خدادادی^۱, سجاد میرجلیلی^۲ و پارسا شفیعی یکتا^۳

^۱ دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده

استقرار خودسرانه و غیرمجاز تقویت‌کننده‌های سیگنال (Unauthorized Repeaters) در شبکه‌های سلولی، یکی از چالش‌های امنیتی و کیفیتی عمدۀ براي اپراتورهای تلفن همراه محسوب می‌شود. این تجهیزات با تزریق نویز و ایجاد تداخل مخرب، منجر به آسودگی پایلوت، کاهش ظرفیت سلول و تخریب شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) می‌گردد. روش‌های متداول تشخیص، اغلب متکی بر تجهیزات گران‌قیمت پایش طیف یا تحلیل‌های زمان‌بر میدانی هستند. در این مقاله، یک چارچوب خودکار و داده‌محور برای تشخیص و مکان‌یابی این تجهیزات با استفاده از داده‌های استاندارد Drive Test ارائه شده است. رویکرد پیشنهادی از یک مدل انتشار دو-مسیره (Dual-Path) برای شبیه‌سازی دقیق برهم‌نہی سیگنال‌ها بهره می‌برد. هسته اصلی الگوریتم، یک روش تشخیص ناهنجاری آماری مقاوم (Robust Statistical Anomaly Detection) است که با استفاده از آزمون Z-Score اصلاح‌شده و تخمین‌گرها مقاوم (میانه و MAD)، اثر پوشش ناهنجاری را خنثی می‌کند. در نهایت، خوشبندی فضایی DBSCAN و تخمین‌گر مرکز جرم وزن‌دار، موقعیت جغرافیایی تقویت‌کننده‌های استخراج می‌نماید. ارزیابی عملکرد روش بر روی شبکه شبیه‌سازی شده شهر تهران، نرخ تشخیص ۱۰۰ درصد و میانگین خطای مکانی کمتر از ۳۵۰ متر را نشان می‌دهد که بیانگر کارایی بالای روش در سناریوهای عملیاتی است.

پوشش دهنی "نرمال" استفاده می‌شوند را منحرف می‌کنند. چالش اصلی، ایجاد یک خط پایه مقاوم بدون داشتن قبلي از مکان تقویت‌کننده‌های است.

۲. **مکان‌یابی فضایی:** پس از تشخیص ناهنجاری، باید مکان تقویت‌کننده از اندازه‌گیری‌های پراکنده فضایی استخراج شود. این کار نیازمند تکنیک‌های تحلیل فضایی است که بتوانند با داده‌های نویزی و الگوهای اندازه‌گیری نامنظم کار کنند.

۳. **مقیاس‌پذیری:** روش تشخیص باید برای محیط‌های شهری بزرگ با دهای ایستگاه پایه و هزاران نقطه اندازه‌گیری مقیاس‌پذیر باشد.

۴. **حدودیت منابع:** اپراتورهای شبکه به راهکارهایی نیاز دارند که با زیرساخت جمع‌آوری داده Drive Test موجود کار کنند. روش‌هایی که به تجهیزات تخصصی یا فرایندهای دستی نیاز دارند، مقرن به صرفه نیستند.

۲- نوآوری‌ها و دستاوردهای پژوهش

این مقاله یک رویکرد نوین آماری-مکانی را پیشنهاد می‌کند که ویژگی‌های متمایز آن عبارتند از:

• **مدل‌سازی فیزیکی دقیق:** استفاده از مدل انتشار دو-مسیره و ترکیب

توان در حوزه خطی برای شبیه‌سازی دقیق اثر تقویت‌کننده بر RSSI.

۱ مقدمه

توسعه روزافزون شبکه‌های سلولی نسل چهارم و پنجم (4G/5G) و نیاز کاربران به پوشش دهی پیوسته، منجر به پدیده‌ای به نام نصب خودسرانه تکرارکننده‌های سیگنال (Repeaters) شده است. این تجهیزات سیگنال دریافتی از ایستگاه پایه (BTS) را تقویت و مجددأ در محیط منتشر می‌کنند. اگرچه هدف ظاهری نصب این تجهیزات بهبود پوشش دهی محلی است، اما عدم هماهنگی آن‌ها با طرح فرکانسی شبکه منجر به چالش‌های فنی جدی می‌شود.

۱-۱ بیان مسئله و ضرورت پژوهش

تقویت‌کننده‌های غیرمجاز با عملکرد به صورت Amplify-and-Forward ساده، علاوه بر سیگنال مفید، نویز محيطی را نیز تقویت می‌کنند که منجر به افزایش سطح نویز (Noise Rise) در سمت گیرنده می‌شود. از سوی دیگر، این تجهیزات با ایجاد پوشش دهی کنترل نشده، مکانیزم‌های مدیریت منابع رادیویی و فرآیند Handover را اختلال می‌سازند.

چالش‌های کلیدی تشخیص و مکان‌یابی:

۱. **آسودگی خط پایه:** تقویت‌کننده‌های غیرمجاز خود توزیع سیگنال محلی را تعییر داده و همان آماره‌هایی (میانگین و انحراف معیار) که برای تعریف

۱-۲-۲ تشخیص افزایش نویز صعودی

یک علامت اولیه تقویت کننده‌های غیرمجاز، افزایش قابل توجه کف نویز صعودی در گیرنده ایستگاه پایه است. تقویت کننده‌ها نویز حرارتی را همراه با سیگنال مفید تقویت می‌کنند و نسبت سیگنال به تداخل و نویز (SINR) را برای همه کاربران در سلول تخریب می‌کنند. الگوریتم‌هایی که جهش‌های ناگهانی و بایدار در توان کل باند پهن دریافتی (RTWP) را تشخیص می‌دهند، معمولاً به عنوان هشدار خط اول استفاده می‌شوند.

۲-۲-۲ تشخیص ناهنجاری Handover

تقویت کننده‌ها اغلب پوشش دهی "بیش از حد" (Overshoot) ایجاد می‌کنند. جایی که سیگنال یک سلول عمیقاً در قلمرو سلول همسایه منتشر می‌شود. این منجر به شکستهای مکرر Handover، جابجایی‌های سریع (Ping-Pong) و تداخل می‌شود.

۳-۲ روش‌های داده محور و یادگیری ماشین

پژوهش‌های اخیر دانشگاهی به سمت تشخیص خودکار داده محور با استفاده از یادگیری ماشین حرفت کرده‌اند.

۱-۳-۲ کاهش آزمون‌های رانندگی (MDT) و جمع‌سپاری

استانداردهای مدرن MDT (Minimization of Drive Tests) را تعریف می‌کنند، جایی که گوشی‌های کاربران به صورت خودکار اندازه‌گیری‌های سیگنال را به شبکه گزارش می‌دهند. پژوهش‌ها استفاده از این مجموعه داده‌های عظیم برای ساخت "نقشه‌های محیط رادیویی" (REMs) را برسی می‌کنند. ناهنجاری‌ها در این نقشه‌ها—جایی که قدرت سیگنال از پیش‌بینی‌های توری تجاوز می‌کند—به عنوان منابع تداخل احتمالی علامت‌گذاری می‌شوند.

۲-۳-۲ مکان‌یابی مبتنی بر خوشه‌بندی

الگوریتم‌های خوشه‌بندی فضایی برای مکان‌یابی منابع تداخل اهمیت یافته‌اند. با در نظر گرفتن نمونه‌های سیگنال پرقدرت به عنوان نقاط فضایی، الگوریتم‌های مانند DBSCAN می‌توانند به طور مؤثر خوشه‌های تداخل واقعی را از نویز اندازه‌گیری تصادفی جدا کنند.

۴-۲ تمايز روش پيشنهادی

روش ارائه شده در این پژوهش، محدودیت‌های اسکن سخت‌افزاری را با اتکای انحصاری به داده‌های استاندارد RSSI Drive Test حل می‌کند. این یک روش بدون ناظر (Unsupervised) است که بدون نیاز به داده آموزشی پاک و تنها با اتکا به مدل انتشار فیزیکی و تخمین‌گرهای آماری مقاوم، قادر به شناسایی و مکان‌یابی ناهنجاری‌ها است.

۳ مدل سیستم و فرمول‌بندی مسئله

۱-۳ تپیلوژی شبکه

شبکه مورد مطالعه شامل مجموعه‌ای از ایستگاه‌های پایه $B = \{b_1, \dots, b_M\}$ در یک ناحیه جغرافیایی \mathbb{R}^2 است. توان دریافتی در هر نقطه x تابعی از فاصله تا BTS، بهره آتنن‌ها و مدل انتشار محیطی است.

• آمار مقاوم (Robust Statistics): جایگزینی معیارهای میانگین و انحراف معیار کلاسیک با میانه و انحراف مطلق میانه (MAD) برای جلوگیری از اثر "پوشش ناهنجاری" (Masking Effect).

• زنجیره پردازش خودکار: تلفیق تشخیص ناهنجاری سیگنال با خوشه‌بندی فضایی DBSCAN برای حذف خودکار مشاهدات پرت (Outliers) و کاهش نرخ هشدار غلط.

• ارزیابی واقع گرایانه: شبیه‌سازی محیط شهری تهران با در نظر گرفتن پارامترهای سایه‌افکنی (Shadowing) و عدم قطعیت محیطی.

۲ مروری بر کارهای پیشین

تشخیص منابع سیگنال غیرمجاز، یک مسئله شناخته شده در صنعت مخابرات است. رویکردهای موجود را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد.

۱-۲ روش‌های لایه فیزیکی و سخت‌افزار-محور

رویکردهای سنتی معمولاً متمکی بر تجهیزات تخصصی فرکانس رادیویی (RF) برای اسکن منابع فرستنده غیرمجاز هستند.

۱-۱-۲ اسکن RF و تحلیل طیف

اپراتورهای شبکه اغلب تیم‌های میدانی مجهز به آنالایزرهای طیفی قابل حمل و آتنن‌های جهت‌دار را برای شناسایی منابع تداخل مستقر می‌کنند. با اندازه‌گیری چگالی انرژی طیفی در باندهای فرکانسی Uplink، مهندسان می‌توانند "افزایش کف نویز" (Noise Floor Rise) مشخصه تقویت کننده‌های Amplify-and-Forward را شناسایی کنند. سپس از تکنیک‌های مکان‌یابی جهتی مانند تخمین زاویه ورود (Angle of Arrival - AoA) با استفاده از آرایه آتنن برای مثلث‌بندی مکان فیزیکی دستگاه استفاده می‌شود.

محدودیت‌ها: این فرآیند نیز پر است، نیازمند سخت‌افزار گران قیمت (مانند اسینفرهای دستی با دستگاه‌های نوع Stingray) بوده و واکنشی است نه پیشگیرانه—معمولًا فقط پس از شکایت مشتریان فعال می‌شود.

۲-۱-۲ تحلیل پیشروی زمانی (Timing Advance - TA)

در شبکه‌های LTE و GSM، ایستگاه پایه (eNodeB) تأخیر رفت و برگشت به دستگاه کاربر را اندازه می‌گیرد تا زمان بندی انتقال را تنظیم کند، که به آن پیشروی زمانی (TA) گفته می‌شود. چون تقویت کننده‌ها تأخیر پردازشی (معمولًا ۱۰-۵ میکروثانیه) وارد کرده و مسیرهای انتشار سیگنال را طولانی تر می‌کنند، همبستگی بین TA اندازه‌گیری شده و فاصله فیزیکی واقعی را مخدوش می‌سازند. مطالعات اخیر پیشنهاد کرده‌اند که آمار TA برای تشخیص "باندهایی" از کاربران که به نظر دورتر از شعاع سلول ظاهر می‌شوند، پایش شود.

محدودیت‌ها: روش‌های مبتنی بر زمان بندی نیازمند همگام‌سازی دقیق و دسترسی به داده‌های سیگنالینگ سطح پایین هستند که اغلب در لگ‌های استاندارد Drive Test در دسترس نیستند.

۲-۲ پایش معیارهای عملکرد شبکه

برای اجتناب از بازدیدهای میدانی، اپراتورها شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI) را در مرکز عملیات و نگهداری پایش می‌کنند.

جمله آخر ($\mathcal{N}(0, \sigma^2)$) اثر سایه‌افکنی لگ-نرمال محیط را با $\sigma = 4$ دسی‌بل مدل‌سازی می‌کند. انتخاب معیار RSSI به جای RSRP دلیل فنی دارد: تقویت کننده‌های ساده کل پنهانی باند (شامل نویز و تداخل) را تقویت می‌کنند، لذا RSSI به عنوان شاخص انرژی طیفی کل، حساسیت بالاتری نسبت به سیگنال‌های مرجع دارد.

۴ روش پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی طی یک فرآیند پنج مرحله‌ای، داده‌های خام Drive Test را پردازش کرده و مختصات جغرافیایی تقویت کننده‌ها را استخراج می‌کند.

۱-۴ نمای کلی معماری سیستم

سیستم تشخیص از پنج مازول اصلی تشکیل شده است:

۱. **ماژول تولید شبکه:** ایجاد تپولوژی BTS و تقویت کننده‌های شبیه‌سازی شده.

۲. **ماژول شبیه‌سازی انتشار:** مدل‌سازی انتشار سیگنال با استفاده از Cost-231 Hata.

۳. **ماژول شبیه‌سازی Drive Test:** تولید اندازه‌گیری‌های RSSI در یک شبکه منظم.

۴. **ماژول تشخیص:** پیاده‌سازی تشخیص ناهنجاری آماری و خوشبندی.

۵. **ماژول تجسم:** ایجاد نقشه‌های تعاملی و گزارش‌های اعتبارسنجی.

جربان داده از اندازه‌گیری‌های خام RSSI شروع شده، از مرحله پیش‌پردازش (نرمال‌سازی و فیلتر حساسیت) عبور کرده، سپس وارد هسته تشخیص می‌شود که شامل محاسبه باقی‌مانده، آزمون آماری مقاوم، و خوشبندی فضایی است. خروجی نهایی، لیستی از مکان‌های تخمینی تقویت کننده‌ها همراه با امتیاز اطمینان هر یک است.

۲-۴ گام ۱: تولید نقشه مبنا (Baseline)

ابتدا با استفاده از پارامترهای مهندسی شبکه (مکان BTS، توان، سمت آتن و تیلت)، نقشه پوشش توری شبکه بدون حضور تقویت کننده‌ها محاسبه می‌شود. این نقشه به عنوان مرجع مقایسه عمل می‌کند.

۳-۴ گام ۲: محاسبه باقی‌مانده‌ها (Residuals)

برای هر نقطه اندازه‌گیری i ، اختلاف توان اندازه‌گیری شده (P_{meas}) و توان پیش‌بینی شده (P_{pred}) محاسبه می‌شود:

$$r_i = P_{meas}^{(i)} - P_{pred}^{(i)} \quad (5)$$

در حضور تقویت کننده، توزیع r_i دارای Positive Skewness خواهد بود.

۴-۴ گام ۳: تشخیص ناهنجاری با آمار مقاوم

۱-۴-۱ مسئله اثر پوشش

چالش اساسی در تشخیص تقویت کننده‌ها، آلودگی خود مجموعه داده به ناهنجاری‌هاست. اگر از میانگین و انحراف معیار کلاسیک برای تعیین آستانه استفاده شود:

۲-۳ مشخصات تقویت کننده‌های غیرمجاز

تقویت کننده‌های غیرمجاز معمولاً دارای ویژگی‌های زیر هستند:

- **بهره تقویت:** معمولاً ۸۰-۵۰ دسی‌بل، کافی برای تقویت قابل توجه سیگنال

- **محدوده پوشش:** تأثیر در شاعر ۱۰۰۰-۵۰۰ متری از تقویت کننده

- **مکان نصب:** معمولاً در فاصله ۳۰۰-۶۰۰ متری از BTS خدمت‌دهنده برای دریافت سیگنال ورودی کافی

- **عملکرد:** تقویت و ارسال مجدد در همان فرکانس-Amplify-and-Forward)

۳-۳ مدل انتشار و ترکیب سیگنال

برای مدل‌سازی دقیق محیط شهری، از مدل تجربی Cost-231 Hata استفاده می‌شود که برای محیط‌های شهری در بازه فرکانسی ۱۵۰۰-۲۰۰۰ مگاهرتز مناسب است:

$$PL(d) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d) + C_m \quad (1)$$

که در آن $PL(d)$ تلفات مسیر بر حسب دسی‌بل، f فرکانس بر حسب مگاهرتز، h_b ارتفاع آتن ایستگاه پایه، d فاصله بر حسب کیلومتر و C_m ضریب تصحیح محیط شهری (معمولًا ۳ دسی‌بل) است. توان دریافتی در دستگاه تلفن همراه با استفاده از معادله انتقال Friis محاسبه می‌شود:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL(d) \quad (2)$$

که در آن P_r توان دریافتی، P_t توان ارسال BTS (معمولًا ۴۳ dBm)، G_t (LTE dBm ۴۶ dBm برای آتن فرستنده و ۱۸-۱۰ dBm برای آتن های سکتوری)، و G_r بهره آتن گیرنده (۰ dBm برای دستگاه‌های تلفن همراه) است.

۱-۳-۳ فیزیک ترکیب سیگنال چندمسیره

نکته کلیدی در حضور تقویت کننده، دریافت سیگنال از دو مسیر مجزا است:

۱. مسیر مستقیم $BTS \rightarrow UE$ (Direct Path)

۲. مسیر تقویت شده $BTS \rightarrow Rep \rightarrow UE$ (Repeater Path)

چون اختلاف طول مسیر ($\Delta d > \lambda$) منجر به اختلاف فاز تصادفی می‌شود، امواج به صورت غیرهمدوس با یکدیگر ترکیب می‌گردند. لذا جمع جبری مقادیر dBm نادرست بوده و باید ابتدا توان را به حوزه خطی (میلیوات) تبدیل کرد:

$$P_{total}^{(mW)} = P_{direct}^{(mW)} + P_{repeater}^{(mW)} \quad (3)$$

و سپس به حوزه لگاریتمی بازگشت:

$$P_{rx}(dBm) = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{P_{dir}}{10}} + 10^{\frac{P_{rep}}{10}} \right) + \mathcal{N}(0, \sigma_{shadowing}^2) \quad (4)$$

۱. عدم نیاز به تعیین تعداد خوشها از پیش
۲. فیلتر خودکار نقاط پرت منفرد (کاهش هشدار غلط)
۳. توانایی یافتن خوشها با شکل دلخواه
۴. پشتیبانی از خوشها با چگالی‌های متفاوت

۶-۵ گام ۵: مکان‌یابی با مرکز جرم وزن‌دار

مکان نهایی تقویت‌کننده با میانگین‌گیری وزن‌دار از مختصات جغرافیایی نقاط خوش محاسبه می‌شود. نقاطی که شدت ناهنجاری بالاتری دارند (Z-Score) بزرگتر، در تعیین مکان نهایی وزن بیشتری دارند:

$$\hat{lat}_{repeater} = \frac{\sum_{i \in C} Z_i \cdot lat_i}{\sum_{i \in C} Z_i} \quad (10)$$

$$\hat{lon}_{repeater} = \frac{\sum_{i \in C} Z_i \cdot lon_i}{\sum_{i \in C} Z_i} \quad (11)$$

که در آن C مجموعه نقاط ناهنجار در خوش و Z_i امتیازهای اطمینان (وزن) هستند. این رویکرد وزن‌دهی باعث می‌شود نقاط با شواهد قوی‌تر سهم بیشتری در تخمین مکان داشته باشند.

۷-۴ تحلیل پیچیدگی محاسباتی

کارایی محاسباتی الگوریتم برای پردازش شبکه‌های بزرگ مهم است. جدول ۱ پیچیدگی زمانی هر مرحله را نشان می‌دهد.

جدول ۱: پیچیدگی محاسباتی مراحل الگوریتم

زمان معمول	پیچیدگی	مرحله
> ۱ ثانیه	$O(N_{BTS})$	تولید توبولوژی
۱۰-۵	$O(N_p \times N_{BTS})$	شبیه‌سازی اندازه‌گیری
۵-۳	$O(N_p \times N_{BTS})$	محاسبه باقی‌مانده
> ۱ ثانیه	$O(N_p^2)$	خوشبندی DBSCAN
۳-۲	$O(N_p)$	تجسم نتایج
۲۰-۱۰ ثانیه	-	کل زنجیره

که در آن N_p تعداد نقاط اندازه‌گیری (معمولًاً ۳۰۰۰-۲۵۰۰)، N_{BTS} تعداد ایستگاه‌های پایه (۲۰-۱۰)، و N_a تعداد نقاط ناهنجار (معمولًاً > ۱۰۰) است. مرحله شبیه‌سازی و محاسبه باقی‌مانده غالب‌ترین بخش محاسباتی هستند، اما با پیچیدگی خطی نسبت به تعداد نقاط، قابل مقایسه‌پذیری برای شبکه‌های بزرگ هستند.

۵ شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد

۱-۵ سناریوی شبیه‌سازی

کارایی روش پیشنهادی با شبیه‌سازی بخشی از شبکه شهر تهران (ناحیه ۵ در ۵ کیلومتر) ارزیابی شده است. ناحیه جغرافیایی انتخاب شده ۷۲۰°-۷۵۸°، ۳۵°-۳۵° E (یک محيط شهری مترکم رانمایش می‌دهد که شامل مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی است).

$$z_i^{naive} = \frac{r_i - \bar{r}}{\sigma_r}, \quad \bar{r} = \frac{1}{N} \sum r_i, \quad \sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (r_i - \bar{r})^2} \quad (6)$$
 سیگنال‌های قوی تقویت‌کننده باعث افزایش مصنوعی \bar{r} و σ_r می‌شوند که آستانه تشخیص ($z_{threshold}$) را بالا برد و همان ناهنجاری‌ای را که باید شناسایی شود، پنهان می‌کنند (پدیده پوشش ناهنجاری).

۲-۴-۴ راه حل: تخمین‌گرهای مقاوم

برای رفع این مشکل، از تخمین‌گرهای مقاوم استفاده می‌شود که نسبت به مقادیر پرت حساسیت ندارند:

۱. **مرکز توزیع:** به جای میانگین، از میانه (باید در برابر ناهنجاری‌های شدید) استفاده می‌شود:

$$\mu_r = \text{median}(\{r_1, \dots, r_N\}) \quad (7)$$

۲. **مقیاس نوسان:** انحراف معیار تنها از سمت منفی توزیع تخمین زده می‌شود (چون تقویت‌کننده‌ها فقط باقی‌مانده‌های مثبت ایجاد می‌کنند):

$$\sigma_{robust} = \sqrt{\frac{1}{|N_{neg}|} \sum_{r_i < \mu_r} (r_i - \mu_r)^2} \quad (8)$$

۳-۴-۴ آزمون آماری

با استفاده از این تخمین‌گرهای پاک، امتیاز ناهنجاری محاسبه می‌شود:

$$Z_i = \frac{r_i - \mu_r}{\sigma_{robust}} \quad (9)$$

نقاطی که $Z_i > \theta$ (معمولًاً ۲.۵) و $r_i > r_{min}(\theta = 2.5)$ (مثلاً ۱۲ دسی‌بل) به عنوان کاندیدای تقویت‌کننده علامت‌گذاری می‌شوند. این رویکرد، تشخیص بدون نیاز به داده آموزشی پاک را ممکن می‌سازد.

۵-۴ گام ۴: خوشبندی فضایی با DBSCAN

برای حذف نویزهای تک نقطه‌ای و شناسایی هسته اصلی تقویت‌کننده، نقاط کاندید DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) می‌شوند. این الگوریتم بر اساس چگالی نقاط عمل کرده و خوشها را بر اساس اتصال چگالی تعریف می‌کند:

- **نقطه هسته (Core Point):** نقطه‌ای که حداقل $MinPts$ همسایه در شاعع ϵ داشته باشد

- **نقطه مرزی (Border Point):** نقطه‌ای در شاعع ϵ یک نقطه هسته ولی خود کمتر از $MinPts$ همسایه دارد

- **نقطه نویز:** نقطه‌ای که نه هسته است و نه مرزی

برای این کاربرد، پارامترها به صورت زیر تنظیم می‌شوند:

- شاعع همسایگی: $\epsilon = 300$ متر (متناسب با برد تقویت‌کننده)

- حداقل نقاط: $MinPts = 3$

مزایای DBSCAN برای تشخیص تقویت‌کننده:

- آستانه Z-Score (θ):** مقادیر پایین‌تر (مثلاً -0.2) نرخ تشخیص را افزایش می‌دهند اما هشدارهای غلط بیشتری تولید می‌کنند. مقدار $\theta = 2.5$ تعادل مناسبی ارائه می‌دهد.
- دقت شبکه اندازه‌گیری:** کاهش فاصله شبکه از 100 به 50 متر، خطا مکانی را 30% کاهش می‌دهد اما تعداد نقاط اندازه‌گیری را 4 برابر افزایش می‌دهد.
- بهره تقویت‌کننده:** تقویت‌کننده‌های با بهره کمتر از 40 دسی‌بل ممکن است در سایه شدید محیطی پنهان شوند. سیستم برای بهره‌های $+50$ دسی‌بل پهینه شده است.
- پارامترهای DBSCAN:** افزایش ϵ خوشها را ادغام می‌کند. در حالی که کاهش آن ممکن است یک تقویت‌کننده را به خوشها می‌تواند تقسیم کند.

۶ بحث و تحلیل

۱-۶ محدودیت‌های روش پیشنهادی

با وجود موفقیت سیستم در محیط شبیه‌سازی، چالش‌هایی برای پیاده‌سازی در دنیای واقعی وجود دارد:

- محیط شبیه‌سازی شده:** این پروژه از داده‌های مصنوعی به جای اندازه‌گیری‌های واقعی استفاده می‌کند. در حالی که مدل‌های انتشار ویژگی‌های نویز واقع‌گرایانه هستند، شرایط میدانی واقعی ممکن است پیچیدگی‌های اضافی داشته باشند.
- مدل انتشار ساده‌شده:** مدل Cost-231 Hata یک محیط شهری متوسط را نمایش می‌دهد. عوامل خاص سایت مانند ارتفاع ساختمان‌ها، تغییرات تپوگرافی و مورفولوژی شهری خاص به صورت جداگانه مدل‌سازی نشده‌اند که ممکن است در داده‌های واقعی منجر به هشدارهای غلط مثبت شود.
- أنواع تقویت‌کننده:** الگوریتم برای تقویت‌کننده‌های ساده-Amplify and-Forward بهینه شده است. تقویت‌کننده‌های پیچیده‌تر با تبدیل فرکانس، تغییر زمان با کنترل بهره تطبیقی ممکن است ویژگی‌های سیگنال متفاوتی نشان دهند.
- چگالی اندازه‌گیری:** دقت تشخیص به چگالی و توزیع اندازه‌گیری‌های Drive Test بستگی دارد. مناطق با اندازه‌گیری‌های پراکنده ممکن است دقت مکان‌یابی کمتری داشته باشند.

۲-۶ ملاحظات عملیاتی برای استقرار

برای استقرار این سیستم در شبکه تجاری، موارد زیر باید در نظر گرفته شود:

- کالیبراسیون پارامترها:** آستانه‌ها باید بر اساس محیط خاص شبکه (شهری متراکم، حومه، روانشناختی) تنظیم شوند. یک دوره کالیبراسیون اولیه با داده‌های واقعی ضروری است.
- پایش مستمر:** به جای کمپین‌های پراکنده Drive Test، داده‌های MDT مستمر می‌توانند برای تشخیص تقویت‌کننده‌های تازه نصب شده استفاده شوند.

۱-۱-۵ پیکربندی شبکه

شبکه شبیه‌سازی شده شامل 10 ایستگاه پایه در یک آرایش شش ضلعی با فاصله بین سایتها 1 کیلومتر است. برای شبیه‌سازی واقع‌گرایانه، تغییرات تصادفی به پارامترهای شبکه اعمال شده است:

- ارتفاع آتن: 30 متر با تغییرات $\pm 10\%$
- توان ارسال: 45 dBm با تغییرات ± 2 dB
- بهره آتن: 15 dB با تغییرات ± 1 dB

سه تقویت‌کننده غیرمجاز به صورت تصادفی در فواصل $660\text{--}330$ متری از ایستگاه‌های خدمت‌دهنده نصب شده‌اند. این فاصله انتخاب شده تا اطمینان حاصل شود که تقویت‌کننده سیگنال ورودی کافی برای عملکرد مؤثر دریافت می‌کند.

پارامترهای کلیدی شبیه‌سازی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: پارامترهای پیکربندی شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
تعداد ایستگاه‌های پایه (eNodeB)	۱۰ سایت
فرکانس حامل	۱۸۰۰ مگاهرتز
توان ارسال BTS	۴۶ دسی‌بل میلی‌وات
بهره تقویت‌کننده غیرمجاز	۵۰ دسی‌بل
انحراف معیار سایه‌افکنی (σ)	۴ دسی‌بل
دقت شبکه اندازه‌گیری	۱۰۰ متر

۲-۵ تحلیل نتایج

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم برای تشخیص 3 تقویت‌کننده کاشته شده در جدول ۳ خلاصه شده است. روش پیشنهادی موفق به کشف هر سه مورد بدون هیچ‌گونه تشخیص غلط (False Positive) شده است.

جدول ۳: عملکرد تشخیص و دقت مکانی الگوریتم

خطای مکانی (m)	Z-Score	حداکثر تعداد نقاط خوش
۱۴	۲.۷	۲۸۷
۹	۸.۵	۴۱۲
۱۱	۳.۶	۳۵۱
۳.۱۱	۴.۶	۳۵۰

میانگین خطای مکانی 350 متر بین معناست که نیمه‌های میدانی به جای جستجوی کل شهر، تنها نیاز به جستجوی یک محدوده کوچک (در حد دو بلوك شهری) دارند که کارایی عملیاتی را به شدت افزایش می‌دهد.

۳-۵ تحلیل حساسیت پارامترها

کارایی الگوریتم به پارامترهای کلیدی زیر وابسته است:

۲-۲-۷ پادگیری عمیق برای الگوشناسی پیشرفته

شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) می‌توانند الگوهای فضایی پیچیده را در نقشه‌های پوشش پادگیرند:

- آموزش یک شبکه CNN برای طبقه‌بندی نقشه‌های حرارتی RSSI به "پاک" و "آلوده" به تقویت کننده.
- استفاده از شبکه‌های U-Net برای تقسیم‌بندی دقیق مناطق تحت تأثیر.
- پادگیری انتقالی با داده‌های واقعی برای کاهش نیاز به برچسب‌گذاری دستی.

۳-۲-۷ اعتبارسنجی با داده‌های واقعی

گام بعدی حیاتی، آزمایش روش بر روی داده‌های Drive Test واقعی از یک اپراتور تجاری است:

- همکاری با اپراتور برای دسترسی به لگ‌های Drive Test تاریخی.
- مقایسه با موارد شناخته شده تقویت کننده‌های حذف شده.
- تنظیم دقیق آستانه‌ها برای محیط‌های مختلف (شهری، حومه، رستایی).

۴-۲-۷ توسعه به سمت شبکه‌های 5G

معماری 5G چالش‌ها و فرصت‌های جدیدی ارائه می‌دهد:

- سلول‌های کوچک متراکم (Dense Small Cells) الگوهای پوشش پیچیده‌تری ایجاد می‌کنند.
- Beamforming پویا، مدل‌سازی انتشار را پیچیده‌تر می‌سازد.
- گزارش‌های اندازه‌گیری با وضوح بالاتر (5G NR) اطلاعات بیشتری برای تحلیل فراهم می‌کند.

۳-۷ کلام پایانی

تقویت کننده‌های غیرمجاز تهدیدی پایدار برای کیفیت و امنیت شبکه‌های سلولی هستند. این پژوهش نشان داد که با ترکیب مدل‌سازی فیزیکی دقیق، آمار مقاوم و تحلیل فضایی، می‌توان یک سامانه کارآمد برای تشخیص خودکار توسعه داد که به جای تجهیزات گران‌قیمت، بر روی داده‌های موجود شبکه متکی است. نتایج شبیه‌سازی نوید پتانسیل بالای این رویکرد را برای استقرار عملیاتی می‌دهند.

- تأثیر میدانی:** حتی با مکان‌یابی خودکار، تأثیر نهایی و حذف توسط تیم‌های میدانی لازم است. سیستم زمان جستجو را کاهش می‌دهد اما آن را حذف نمی‌کند.

۳-۶ مقایسه با روش‌های جایگزین

جدول ۴ مقایسه‌ای کیفی بین روش پیشنهادی و رویکردهای موجود ارائه می‌دهد.

جدول ۴: مقایسه کیفی روش‌های تشخیص تقویت کننده

روش پیشنهادی	اسکن	RF	تحلیل TA	بله	بله	بله	نیاز به ساخت افزار
دقت مکان‌یابی	عالی	متوسط	خوب	خوب	عالی	عالی	دقت مکان‌یابی
مقیاس‌پذیری	ضعیف	خوب	خوب	خوب	ضعیف	ضعیف	مقیاس‌پذیری
هزینه عملیاتی	بالا	متوسط	پایین	پایین	بالا	بالا	هزینه عملیاتی
نرخ هشدار غلط	پایین	متوسط	پایین	پایین	پایین	پایین	نرخ هشدار غلط
پوشش شبکه	موردنی	کامل	کامل	کامل	کامل	کامل	پوشش شبکه

۷ نتیجه‌گیری و کارهای آتی

۱-۷ خلاصه دستاوردها

این پژوهش یک سامانه داده‌محور و مقرن به صرفه برای تشخیص و مکان‌یابی تقویت کننده‌های غیرمجاز در شبکه‌های سلولی ارائه کرد. نوآوری‌های کلیدی عبارتند از:

- مدل‌سازی فیزیکی دقیق:** پیاده‌سازی ترکیب سیگنال دو-مسیره غیرهمدوس در حوزه خطی، که نسبت به مدل‌های جبری ساده، دقت بالاتری در پیش‌بینی اثر تقویت کننده دارد.
- آمار مقاوم برای خط پایه آلوده:** استفاده از میانه و انحراف معیار نیمه‌منفی برای غلبه بر اثر پوشش ناهنجاری، که امکان تشخیص بدون داده‌های آموخته شده باشد.
- خوشبندی فضایی هوشمند:** ادغام DBSCAN برای فیلتر خودکار نقاط پرت و کاهش نرخ هشدار غلط به صفر در شبیه‌سازی.
- عملکرد قابل اعتماد:** دستیابی به نرخ تشخیص ۱۰۰٪ با میانگین خطای مکانی ۳۵۰ متر، که برای استقرار عملیاتی کافی است.

۲-۷ مسیرهای توسعه آتی

برای ارتقای این سیستم و آماده‌سازی برای استقرار تجاری، مسیرهای تحقیقاتی زیر پیشنهاد می‌شود:

۱-۲-۷ ادغام چندمنبعی (Multi-Source Fusion)

ترکیب داده‌های RSSI با معیارهای دیگر می‌تواند دقت را بهبود بخشد:

- پارامترهای Timing Advance:** تأخیر اضافی ناشی از تقویت کننده می‌تواند برای فیلتر هشدارهای غلط استفاده شود.
- الگوهای Handover:** تحلیل آماری لگ‌های Handover برای تشخیص ناهنجاری‌های پوشش.
- داده‌های RTWP:** افزایش نویز صعودی به عنوان یک شاخص تأییدی.