

تحلیل و شبیه‌سازی عملکرد کانال ارتباطی پهپاد ارتفاع بلند چند آنتنی با در نظر گرفتن شرایط جوی

محمد رضا طریحی^۱، محمد مهدی نژاد نوری^۲، محمد حسین مدنی^۲

۱ دانشجوی دکتری، پژوهشکده مخابرات، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، mtarihi@nri.ac.ir

۲ دانشیار، پژوهشکده مخابرات، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

چکیده

در این مقاله عملکرد کانال ارتباطی بین ایستگاه زمینی و یک پهپاد ارتفاع بلند چندآنتنه^۱، با در نظر گرفتن شرایط جوی، تحلیل و بررسی شده است. در این سیستم با جانمایی بهینه آرایه آنتن‌های فرستنده و گیرنده، تعامد بین زیرکانال‌ها برقرار شده که نتیجه آن دستیابی به کانال مرتبه کامل و بیشینه شدن ظرفیت است. در این مقاله، با انتخاب یک مدل کانال مناسب (آماري - هندسی) و در نظر گرفتن پارامترهای پروازی پهپاد، در شرایط هوای صاف و کانال دید مستقیم، ظرفیت بهینه کانال، تحلیل ریاضی و شبیه‌سازی شده است. همچنین اثر ریزش باران، به‌عنوان یکی از مهمترین عوامل شرایط جوی بر کیفیت کانال و تغییرات ظرفیت کانال در پهپادهای ارتفاع بلند، با تحلیل ظرفیت قطع شبیه‌سازی شده است. در ادامه برای کانال دید غیرمستقیم، مشخصات آماری (PDF, CDF) سیگنال به نویز دریافتی و متوسط احتمال خطای سمبول برای مدولاسیون MPSK، تحلیل و شبیه‌سازی شده است. در نهایت نتایج شبیه‌سازی با حالات تحلیلی مقایسه شده تا صحت نتایج تئوری به‌دست آمده مشخص شود.

واژگان کلیدی

پهپاد ارتفاع بلند با مداومت پروازی زیاد، سامانه‌های چند ورودی - چند خروجی، کانال انتشار، ظرفیت کانال

۱. مقدمه

پرنده‌های باسرنشین و پرنده‌های بدون‌سرنشین ارتفاع بلند، با مداومت پروازی بالا^۱ تحت عنوان سکوه‌های ارتفاع بلند^۲ استفاده می‌شود. پهپادهای HALE از نظر کلاس‌بندی جز پهپادهای راهبردی با مداومت پروازی بیش از ۲۴ ساعت و برد ۳۰۰ کیلومتر با طول حدود ۱۵ تا ۲۰ متر و عرض بال‌های ۳۰ تا ۵۰ متر هستند که در ارتفاع ۱۷ تا ۲۲ کیلومتری از سطح زمین (لایه استراتوسفر)،

استفاده از منطقه نزدیک به فضا^۳ برای کاربردهای مختلف نظامی و تجاری مانند کنترل و هدایت، سنجش از دور، ناوبری، مراقبت و نظارت، ابرهای محاسباتی و ذخیره‌ساز^۴ داده برای شبکه‌های توزیع شده مقیاس بزرگ^۵ مانند اینترنت اشیا^۶، نسل پنجم تلفن همراه^۷ و شبکه‌های بی‌سیم سنسوری^۸ در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور از کشتی‌های هوایی، بالن،

دید مستقیم و افزایش مرتبه ماتریس کانال دید غیرمستقیم (HNLOS) خواهد بود. در ارتباط با این موضوعات، تحقیقاتی در منابع [۵] تا [۱۱] ارائه شده است. در مأخذ [۵] تعامد بین زیرکانال‌ها در کانال دیدمستقیم، آثار همبستگی بین عناصر آرایه آنتن و ظرفیت کانال بررسی شده است. در [۶] با انتخاب یک مدل کانال سه‌بعدی، تعامد بین زیرکانال‌ها در کانال دید مستقیم و عملکرد آن در باندهای فرکانسی L و S بررسی شده است. در مقالات [۷] و [۸] بر روی مدل کانال HAP و در مقالات [۹] و [۱۰] روی ترکیبات مختلف سامانه MIMO تحقیق و نشان داده شده است که هرچه زیرکانال‌های سیستم MIMO مستقل‌تر باشند، ظرفیت کانال افزایش خواهد یافت. در مقاله [۱۱] نیز با به‌کارگیری راهبرد V-MIMO^{۱۳} در یک شبکه HAP توابع CDF و PDF برای متغیر سیگنال به نویز استخراج و با محاسبه نرخ خطای متوسط سمبول^{۱۴} و ظرفیت کانال، میزان بهبودی آن نسبت به یک سامانه HAP-SISO^{۱۵} نشان داده شده است. نوآوری در این مقاله به چند جهت قابل توجه است: اولاً در کانال دید مستقیم اثر زاویه در عمود (۷) برای آنتن‌های منصوب روی پهپاد به‌منظور برقراری تعامد، بین زیرکانال‌ها در نظر گرفته شده و تغییرات ظرفیت کانال بر اثر تغییرات زوایای جهت‌گیری آنتن‌ها شبیه‌سازی شده است. ثانیاً برای همین سناریو؛ یعنی کانال دید مستقیم ملاحظات مربوط به طراحی عملی و رویکردی مستقل از کارهای صورت گرفته در مقالات [۷-۱۰] به‌منظور همبستگی بین زیرکانال‌ها برای این سناریوی خاص، تحلیل و شبیه‌سازی شده است. ثالثاً برای بررسی اثر باران بر کیفیت و ظرفیت کانال، ظرفیت قطع، احتمال قطع و احتمال خطای سمبول در شرایط کانال دید غیرمستقیم محاسبه و شبیه‌سازی شده است. در این مقاله در بخش ۲ مدل سیستم و کانال بر اساس یک مدل هندسی - آماری و در بخش ۳ وضعیت کانال دید مستقیم در دو زیربخش تحلیل ظرفیت بهینه و ملاحظات طراحی، ارائه شده است و در بخش ۴ وضعیت کانال دید غیرمستقیم با زیربخش‌های تحلیل ظرفیت قطع، تحلیل احتمال قطع و تحلیل متوسط نرخ خطای سمبول و در بخش ۵ نتیجه‌گیری و تحلیل عددی ارائه شده است.

۲. مدل سیستم و کانال

مدل‌های مختلف کانال بر اساس گستردگی منطقه تحت پوشش، طول مسیر رادیویی بین فرستنده و گیرنده، هندسه لینک و تأخیر

پرواز می‌کنند [۱-۳]. در لایه استراتوسفر شرایط جوی مانند دما، فشار، چگالی و رطوبت هوا و همچنین سرعت وزش باد متفاوت بوده و در ملاحظات طراحی این پهپادها باید لحاظ گردد. این سکوها به‌دلیل هزینه کمتر نسبت به ارتباطات ماهواره‌ای و زمینی، تأخیر انتشار کمتر نسبت به ماهواره، ریسک ارتباطی کمتر به‌خاطر در دسترس بودن کانال ارتباطی، زمان استقرار کم و کیفیت کانال مناسب‌تر نسبت به ارتباطات زمینی، به‌عنوان پشتیبان و جایگزین ارتباطات زمینی و ماهواره‌ای در برخی از کاربردهای تجاری و نظامی در نظر گرفته شده است [۱-۴]. از سوی دیگر سامانه‌های چند ورودی - چند خروجی^{۱۶} برای افزایش دایورسیتی و ظرفیت انتقال داده، در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، لذا ترکیب HAP-MIMO قابلیت‌های مناسبی را برای سیستم‌های مخابراتی فراهم خواهد نمود. یکی از الزامات دسترسی به ظرفیت بالا در سامانه‌های چند ورودی - چند خروجی وجود محیط‌های انتشار با تعداد زیاد موانع یا پراکنده‌کننده‌ها^{۱۱} می‌باشد. لذا عملکرد سامانه‌های چند آنتنی در محیط‌های داخلی^{۱۲} و متحرک بهتر خواهد بود؛ زیرا در چنین محیط‌هایی، عناصر ماتریس کانال MIMO ناهمبسته و مرتبه آن کامل، و در نتیجه ظرفیت کانال براساس مرتبه ماتریس افزایش خطی خواهد داشت. به هر علتی همبستگی بین عناصر ماتریس کانال افزایش یابد، به همان میزان مرتبه ماتریس کانال کمتر و در نتیجه ماتری پلکسینگ فضایی (و ظرفیت) کانال کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود در کانال‌های دید مستقیم با افزایش همبستگی بین زیرکانال‌ها، استفاده از MIMO کارایی چندانی به لحاظ افزایش ظرفیت نداشته باشد. لذا در راستای مطالعات موردی در ارتباط با پهپادهای HALE و ایجاد لینک‌های پرظرفیت برای آنها، در این مقاله ابتدا در شرایط هوای صاف با در نظر گرفتن کانال دیدمستقیم (LOS) بین ایستگاه زمینی و پهپاد ارتفاع بلند چند آنتنی نشان داده خواهد شد که با چیدمان مناسب هندسی آرایه آنتن‌ها در فرستنده و گیرنده از نظر جهت‌گیری و فاصله بین آرایه‌ها، تعامد بین زیرکانال‌های سیستم MIMO برقرار خواهد شد که نتیجه آن کامل شدن مرتبه ماتریس و رسیدن به ظرفیت بیشینه خواهد بود. اما در شرایطی که هوا بارانی باشد، یک کانال دید غیرمستقیم به‌علت برخورد سیگنال ارسالی به قطرات باران ایجاد خواهد شد که با افزایش نرخ ریزش باران، ضریب رایسین کانال (Kf) کاهش یافته و اثر کانال دید غیرمستقیم بیشتر می‌شود که نتیجه آن کاهش ظرفیت کانال

شامل سیگنال دیدمستقیم (H_{LOS}) و دید غیرمستقیم ناشی از تغییرات کوتاهمدت از قطره‌های باران (H_{NLOS}^r) طبق ۳ تعریف می‌شود [۱۷]. بنابراین کانال ارتباطی یک کانال فیدینگ رایسین با ضریب رایسین k_r می‌باشد که مستقیماً به شرایط محیطی (هوای بارانی و صاف) بستگی خواهد داشت.

$$H = \sqrt{\frac{K_r}{K_r + 1}} H_{LOS} + \sqrt{\frac{1}{K_r + 1}} H_{NLOS}^r \quad (3)$$

براساس رابطه ۳ دو سناریو وجود خواهد داشت. سناریوی اول، هوای صاف و کانال دیدمستقیم (H_{LOS}) و سناریوی دوم، هوای بارانی و کانال دیدغیرمستقیم (H_{NLOS}) خواهد بود.

۳. سناریوی اول - کانال دید مستقیم

با فرض اینکه در هوای صاف ضریب رایسین کانال (K_r) به اندازه کافی بزرگ باشد، ماتریس کانال دید مستقیم و بهره کانال مطابق ۴ و ۵ تعریف می‌شود، در این حالت h_{ij} فقط تابعی از هندسه و فرکانس لینک است که از توزیع آماری خاصی تبعیت نمی‌کند. در ۵، $d(i,j)$ با توجه به هندسه شکل ۱ فاصله بین آرایه i^{th} خطی آنتن فرستنده تا j^{th} آرایه خطی آنتن گیرنده می‌باشد [۵-۶].

انتشار در مقالات [۱۲-۱۵] بررسی شده است. مدل سیستمی و کانال ارتباطی برای سناریوی MIMO-HALE-UAV با در نظر گرفتن شرایط ریزش باران به صورت شکل ۱ نشان داده می‌شود [۱۵-۱۶]. مدل کانال یک مدل آماری - هندسی می‌باشد که پارامترهای مؤثر آن در جدول ۱ ارائه شده است. سیگنال دریافتی در گیرنده با فرض آنتن‌های جهتی برابر است با:

$$Y = \sqrt{G} H X + n, \quad X \in \mathbb{C}^{n_T \times 1}, \quad Y \in \mathbb{C}^{n_R \times 1}, \quad (1)$$

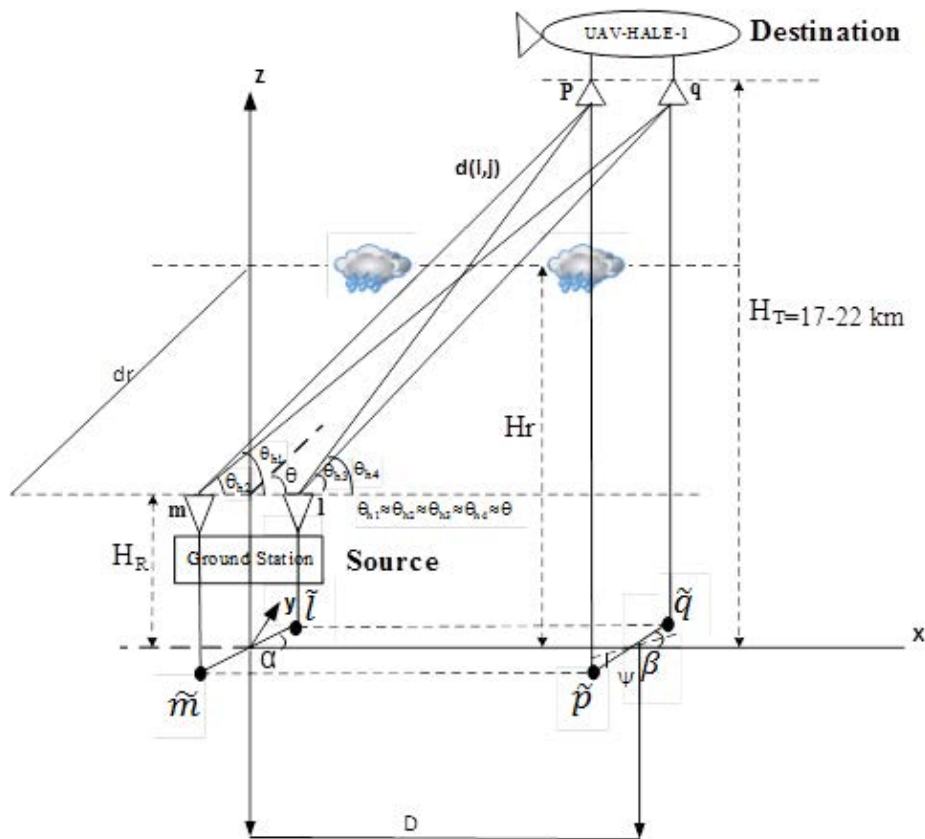
$$H = [h_{ij}] \in \mathbb{C}^{n_T \times n_R}, \quad n \in \mathbb{C}^{n_R \times 1}$$

که در آن، X, Y, H, n_T, n_R به ترتیب سیگنال دریافتی، سیگنال ارسالی، ماتریس بهره‌های مختلط کانال، تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده و بردار نویز می‌باشند و بهره آنتن (G) به صورت ۲ تعریف می‌شود [۳]:

$$G = G_T(dBi) + G_R(dBi) - L_F(dB) - L_r(dB) \quad (2)$$

$$L_F(dB) = 32.4 + 20 \log d(km) + 20 \log f(MHz)$$

به طوری که G_T و G_R بهره آنتن‌های فرستنده و گیرنده، L_F افت فضای آزاد، L_r افت ناشی از باران، d فاصله و f فرکانس است. بردار نویز نیز شامل متغیرهای تصادفی $i.i.d$ گوسی با متوسط صفر و واریانس N_0 می‌باشد. دو مؤلفه سیگنال دریافتی



شکل ۱. مدل سامانه MIMO-HALE-UAV

جدول ۱. پارامترهای مؤثر لینک ارتباطی مطابق با هندسه شکل ۱

توضیحات	پارامتر	ردیف
تعداد آنتن در فرستنده	n_t	۱
تعداد آنتن در گیرنده	n_r	۲
زاویه در ارتفاع آنتن	θ	۳
زاویه تصویر آرایه آنتن فرستنده با محور X در صفحه X-Y	α	۴
زاویه تصویر آرایه آنتن گیرنده با محور X در صفحه X-Y	β	۵
زاویه عمودی آرایه آنتن پهنای نسبت به صفحه X-Y	ψ	۶
فاصله فرستنده و گیرنده روی محور X	D	۷
فواصل المان‌های آنتن در فرستنده و گیرنده	s_r, s_t	۸
فاکتور رایسین که به شرایط محیطی بستگی دارد	k_r	۹
ارتفاع پهنای، ارتفاع ایستگاه زمینی و ارتفاع مؤثر باران	H_R, H_T, H_T	۱۰
فاصله فرستنده تا گیرنده (فاصله در عمق)	d	۱۱

$$d(p, l) = r - 0.5s_r \cos\beta \cos\psi + \frac{(0.5s_r \sin\beta \cos\psi)^2}{2r} \quad (12)$$

$$d(q, l) = r - 0.5s_r \cos\beta \cos\psi + 0.5s_t \cos\alpha + \frac{(0.5s_r \sin\beta \cos\psi - 0.5s_t \sin\alpha)^2}{2(r - 0.5s_r \cos\beta \cos\psi + 0.5s_t \cos\alpha)} \xrightarrow{r \gg s_t, s_r} \quad (13)$$

$$d(q, l) = r - 0.5s_r \cos\beta \cos\psi + 0.5s_t \cos\alpha + \frac{(0.5s_r \sin\beta \cos\psi - 0.5s_t \sin\alpha)^2}{2r}$$

شرط تعامد زیر کانال‌ها در ماتریس H به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\langle h_i, h_j \rangle_{i \neq j} = 0$$

$$\langle h_i, h_j \rangle_{j \neq i} = \sum_{i=1}^{n_t} e^{j2\pi[d(i,m) - d(j,n)]/\lambda} = 0 \quad \forall m, n \in \{1, 2, \dots, n_r\} \quad (14)$$

بر اساس ۱۴ داریم:

$$\frac{2\pi[d(p,m) - d(q,m) - d(p,l) + d(q,l)]}{\lambda} = (2k + 1)\pi \rightarrow d(p, m) - d(q, m) - d(p, l) + d(q, l) = (2k + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (15)$$

با جایگذاری روابط ۷، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ در ۱۵ به دست می‌آید:

$$\frac{s_t s_r \sin\alpha \sin\beta \cos\psi}{2r} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2} \rightarrow s_t s_r = (2k + 1)\frac{\lambda H_T}{\sin\theta \sin\alpha \sin\beta \cos\psi} \cdot \{\alpha, \beta, \theta\} \neq 0, \psi \neq \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

در رابطه ۱۶ شرط تعامد بین زیرکانال‌ها در سناریوی اول با در نظر گرفتن زوایای جهت‌گیری آنتن‌های ایستگاه زمینی و پهنای

$$H_{LOS} = \begin{bmatrix} h_{11,LOS} & h_{12,LOS} & \dots & h_{1n_T,LOS} \\ h_{21,LOS} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ h_{n_R,1,LOS} & \dots & \dots & h_{n_R n_T,LOS} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$h_{ij,LOS} = e^{-j2\pi d(i,j)/\lambda} \quad (5)$$

که برای $n_r=2$ و $n_t=2$ می‌توان ماتریس کانال را به صورت ۶ نوشت:

$$H_{LOS} = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi d(p,m)/\lambda} & e^{-j2\pi d(p,l)/\lambda} \\ e^{-j2\pi d(q,m)/\lambda} & e^{-j2\pi d(q,l)/\lambda} \end{bmatrix} \quad (6)$$

بر اساس هندسه شکل ۱ و با فرض لینک پایین به بالا (ایستگاه زمینی به پهنای) و $H_T \gg H_R$ ، مقادیر $d(p,l)$ ، $d(p,m)$ و $d(q,l)$ و $d(q,m)$ به صورت روابط ۷ تا ۱۰ قابل محاسبه خواهد بود:

$$d(p, m) = r \approx \frac{H_T}{\sin\theta} \quad (7)$$

$$d(q, m) = [(r + 0.5s_t \cos\alpha)^2 + (0.5s_t \sin\alpha)^2]^{1/2} \quad (8)$$

$$d(p, l) = [(r - 0.5s_r \cos\beta \cos\psi)^2 + (0.5s_r \sin\beta \cos\psi)^2]^{1/2} \quad (9)$$

$$d(q, l) = [(r - 0.5s_r \cos\beta \cos\psi + 0.5s_t \cos\alpha)^2 + (0.5s_r \sin\beta \cos\psi - 0.5s_t \sin\alpha)^2]^{1/2} \quad (10)$$

روابط ۸ تا ۱۰ با استفاده از بسط دو جمله‌ای تیلور ساده می‌شوند [۱۸]:

$$d(q, m) = r + 0.5s_t \cos\alpha + \frac{(0.5s_t \sin\alpha)^2}{2(r + 0.5s_t \cos\alpha)} \xrightarrow{r \gg s_t} d(q, m) = r + 0.5s_t \cos\alpha + \frac{(0.5s_t \sin\alpha)^2}{2r} \quad (11)$$

در رابطه ۱۸ ظرفیت زمانی بیشترین مقدار را دارد که $\text{Re}\{e^{-j2\pi(-d(p.m)+d(q.m)+d(p.l)-d(q.l))/\lambda}\}$ کمترین مقدار را داشته باشد، بنابراین باید:

$$| -d(p.m) + d(q.m) + d(p.l) - d(q.l) | = 2k + 1 \frac{\lambda}{2}, k = 0.1.2.3 \dots \quad (21)$$

رابطه ۲۱ دقیقاً معادل ۱۵ است که به نوعی دیگر تعامد بین زیرکانال‌ها و بیشینه شدن ظرفیت را نشان داده است؛ بنابراین بیشینه ظرفیت طبق ۱۸ برابر خواهد شد با:

$$C_{\max} = \log_2[1 + 4\gamma + \gamma^2(2 - 2 \times (-1))] = 2\log_2(1 + 2\gamma) \quad (22)$$

به همین ترتیب، می‌توان گفت که ظرفیت زمانی کمینه است که $\text{Re}\{e^{-j2\pi(-d(p.m)+d(q.m)+d(p.l)-d(q.l))/\lambda}\}$ بیشترین مقدار را دارد، بنابراین:

$$| -d(p.m) + d(q.m) + d(p.l) - d(q.l) | = 2k \frac{\lambda}{2}, k = 0.1.2.3 \dots \quad (23)$$

$$C_{\min} = \log_2[1 + 4\gamma + \gamma^2(2 - 2 \times (+1))] = \log_2(1 + 4\gamma) \quad (24)$$

مرتبه ماتریس کانال H در ۲۲ کامل^{۱۶} و در ۲۴ یک^{۱۷} خواهد بود. در شکل ۲ ظرفیت ارگودیک در این سناریو برای حالت‌های بیشینه و کمینه به ازای مقادیر مختلف SNR شبیه‌سازی شده است و نتایج تئوری به کمک شبیه‌سازی راستی‌آزمایی شده است. همچنین در شکل ۳ ظرفیت در این سناریو با ظرفیت کانال رایلی و ظرفیت کانال تک ورودی - تک خروجی (SISO) مقایسه شده است و نشان داده شده که ظرفیت بیشینه در حالت کامل بودن مرتبه ماتریس کانال، ظرفیت بیشینه و بهینه می‌باشد که به شرط تعامد بین زیرکانال‌ها به دست خواهد آمد.

۳-۲. ملاحظات طراحی در سناریوی اول

رابطه ۱۶ یک کلید طراحی محسوب می‌شود؛ زیرا فواصل آرایه‌های آنتن‌های فرستنده و گیرنده را می‌توان بر اساس هندسه مدل سیستمی به‌گونه‌ای انتخاب نمود که زیرکانال‌های سیستم MIMO متعامد و مرتبه کانال H کامل شود. اما برای طراحی عملی این موضوع باید ملاحظاتی را نظر گرفت:

اولاً حداکثر برد پهپاد که به ازای آن تعامد بین زیرکانال‌ها حفظ شود، محدود خواهد بود. این موضوع در شکل ۴ شبیه‌سازی شده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که برای پوشش برد زیاد باید از فرکانس‌های بالا (>۲۰GHz) در سامانه MIMO-HALE-UAV استفاده نمود؛ یعنی برای داشتن برد زیاد در فرکانس‌های کم و برقراری شرط تعامد زیرکانال‌ها، فاصله $S_T S_R$ بسیار زیاد خواهد شد و عملاً

(θ, α, β و ψ)، طول موج (λ) و ارتفاع پهپاد (H_T) به دست آمده است. این رابطه در مقایسه با مطالعات انجام‌شده در مقاله [۶] اثر تغییرات زاویه در عمود آنتن پهپاد (زاویه ψ) را نیز در نظر می‌گیرد که در ادامه نشان داده خواهد شد. این زوایا در تغییرات شرایط کانال و ظرفیت آن تأثیرگذار خواهند بود.

۳-۱. تحلیل ظرفیت بهینه در سناریوی اول

ظرفیت کانال یک معیار عملکرد مناسب برای ارتباطات بی‌سیم می‌باشد که به دو صورت ظرفیت ارگودیک و ظرفیت قطع قابل تعریف می‌باشد. ظرفیت ارگودیک متوسط نرخ ارسال کانال در زمان‌های مختلف و ظرفیت قطع برای مواقعی که ظرفیت ارگودیک در دسترس نباشد، تعریف می‌شود. ظرفیت قطع به این مفهوم است که اگر فرستنده با یک نرخ مثبت در حال ارسال باشد ($R > 0$) زمان‌هایی وجود خواهد داشت که نرخ ارسال بیشتر از ظرفیت کانال شده و کانال قطع می‌شود که احتمال این رخداد را احتمال قطع می‌گویند. ظرفیت یک سیستم MIMO برای حالتی که اطلاعات کانال برای فرستنده معلوم نیست (no-CSI^{14}) (معمولاً کانال‌های عملی به این صورت است) به صورت ۱۷ بیان می‌شود [۱۱]:

$$C_{\text{erg}} = W \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i P_T}{n_T \sigma^2} \right) = W \log_2 \prod_{i=1}^r \left(1 + \frac{\lambda_i P_T}{n_T \sigma^2} \right) = W \log_2 \left| I_{n_r} + \frac{P_T}{n_T \sigma^2} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right| \quad (17)$$

به طوری که W پهنای باند زیرکانال‌ها، λ_i مقادیر ویژه و r مرتبه ماتریس $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$ تعریف می‌شوند. با جایگذاری ۶ در ۱۷ داریم:

$$C = \log_2 [1 + 4\gamma - \gamma^2 (2 + e^{-j2\pi(-d(p.m)+d(q.m)+d(p.l)-d(q.l))/\lambda} + e^{-j2\pi(d(p.m)-d(q.m)-d(p.l)+d(q.l))/\lambda})] \quad (18)$$

$\log_2 [1 + 4\gamma + \gamma^2 (2 - 2\text{Re}\{e^{-j2\pi(-d(p.m)+d(q.m)+d(p.l)-d(q.l))/\lambda}\})]$ که در آن $\gamma = 10^{\text{SNR}/10}$ مقدار $\text{SNR} = \frac{P_{RX}}{P_N}$ و P_N و P_{RX} به ترتیب توان دریافتی در گیرنده و توان نویز می‌باشد که طبق ۱۹ و ۲۰ قابل محاسبه خواهد بود:

$$P_{RX}(\text{dBW}) = P_{TX}(\text{dBW}) + G \quad (19)$$

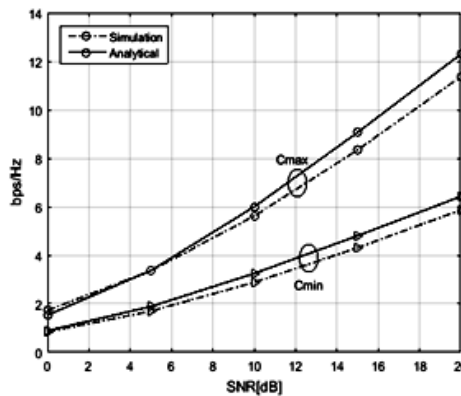
$$P_N(\text{dBW}) = 10 \log(N_0 B) = 10 \log(k T_e B) \quad (20)$$

مقدار بهینه $(S_t S_r)$ تعریف می‌شود که از ملاحظات طراحی خواهد بود. رابطه این ضریب با مقادیر ویژه^{۱۸} کانال (λ_i) به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار روی شرایط کانال می‌باشد:

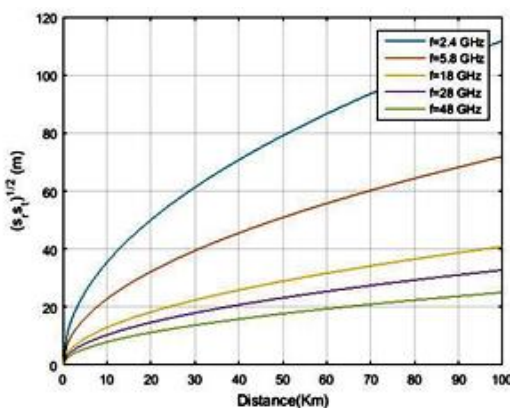
$$\eta = \frac{(S_t S_r)_{Actual}}{(S_t S_r)_{Optimal}} = \frac{(S_t S_r)_{Actual} \sin\theta \sin\alpha \sin\beta \cos\psi}{(2k + 1)\lambda H_T} \quad (25)$$

رابطه^{۲۵} نشان می‌دهد هرچه مقدار η به یک نزدیک شود مقدار واقعی $S_t S_r$ به مقدار بهینه (محاسبات تئوری) نزدیک‌تر خواهد شد و برای η تغییرات بزرگی بر روی $S_t S_r$ واقعی رخ خواهد داد.

طراحی آن عملیاتی نیست. مثلاً برای پوشش برد ۵۰ کیلومتر در فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز مقدار $S_t S_r$ بیشتر از ۱ کیلومتر خواهد شد و با توجه به اینکه یک طرف لینک یک پهپاد HALE با حداکثر طول مثلاً ۳۰ متر ($S_r = 30 m$) می‌باشد، از نظر عملی اصلاً منطقی نیست و استفاده از این تکنیک برای بردهای کوتاه و فرکانس‌های بالا مؤثر می‌باشد. لذا برای پوشش بردهای زیاد، استفاده از مخابرات مشارکتی و پهپادهای رله‌کننده در این سناریو پیشنهاد می‌شود. ثانیاً در ۱۶ به هر دلیلی خطایی در مقدار بهینه $S_t S_r$ رخ دهد، ضریبی تحت عنوان ضریب خطای طراحی (η) به‌صورت نسبت مقدار واقعی $(S_t S_r)$ به



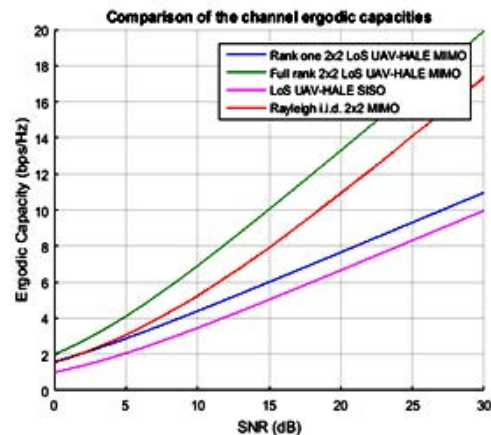
شکل ۲. مقایسه ظرفیت بیشینه و کمینه در سناریوی اول



شکل ۴. حداکثر پوشش و فواصل بین آنتن‌های فرستنده به شرط تعادل زیر کانال‌ها

$$\lambda_{1,2} = 2 \pm [2 + 2\cos(\pi\eta^2)]^{1/2} \quad (28)$$

پارامتر CN^{۱۹} نسبت بیشترین مقدار یکتای^{۲۰} ماتریس به کمترین مقدار یکتای ماتریس، برای ماتریس کانال چندآنتنی تعریف می‌شود که بیان‌کننده عملکرد سیستم MIMO و میزان همبستگی بین زیرکانال‌ها است. طبق تعریف هرچه مقدار CN به یک نزدیک‌تر باشد،



شکل ۳. مقایسه ظرفیت بهینه با ظرفیت کانال رایلی و تک ورودی - تک خروجی

مقادیر ویژه^{۲۰} سیستم MIMO طبق رابطه $|W - \lambda I|$ قابل

محاسبه خواهد بود که در آن W به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W = \begin{cases} HH^H & \text{if } n_t \leq n_r \\ H^H H & \text{if } n_t > n_r \end{cases} \quad (26)$$

$$(2 - \lambda)^2 - 2 - e^{\frac{j2\pi c[d(p,m)+d(q,l)-d(p,l)-d(q,m)]}{f}} - e^{\frac{j2\pi c[-d(p,m)-d(q,l)+d(p,l)+d(q,m)]}{f}} = 0 \quad (27)$$

از حل ۲۷ و مقدارگذاری از ۱۵ مقادیر ویژه^{۲۱} کانال به‌دست می‌آید:

ضریب رایسین برای این شرایط به صورت رابطه تقریبی زیر بیان می شود [۲۰]:

$$K_r(\text{dB}) = \begin{cases} 16.88 - 0.04R_r \text{ dB} & R_r \neq 0 \\ \infty & R_r = 0 \end{cases} \quad (34)$$

طبق رابطه ۳۴ برای هوای صاف ($R_r=0$) کانال دید مستقیم می باشد (H_{LOS}) و برای هوای بارانی ($R_r \neq 0$) کانال توزیع رایسین خواهد داشت که با افزایش ریزش باران، یک کانال رایلی فرض می شود در این شرایط برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز در گیرنده داریم:

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{|\sqrt{GH}|^2 E[s(t)^2]}{E[n(t) \cdot n(t)^H]} = \frac{E[|H|^2]}{N_0 I_{NR}} \frac{G P_s}{N_0 I_{NR}} \\ &= \frac{E[|H|^2]}{E[H^2]} \frac{P_T}{\sigma^2} \end{aligned} \quad (35)$$

با توجه به اینکه h_{ij} گوسی و مختلط با توزیع رایلی فرض می شود، بنابراین توزیع $\text{SNR}_i = \frac{P_T}{\sigma^2} |h_{ij}|^2$ نمایی خواهد بود که تابع چگالی توام آن با فرض یکسان فرض کردن SNR ها از کانولوشنال تک تک توابع چگالی احتمال زیرکانال های سیستم MIMO به دست می آید [۲۱]:

$$f_Y(x) = \frac{x^{N-1}}{\bar{Y}^N \Gamma(N)} e^{-\frac{x}{\bar{Y}}} \quad (36)$$

که در این رابطه \bar{Y} متوسط سیگنال به نویز در i امین لینک، $N=n_T \times n_R$ و Γ تابع گاما تعریف می شود. با استفاده از [۱۸] روابط زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} F_Y(x) &= [1 - \exp(-\frac{x}{\bar{Y}})]^N \\ f_Y(x) &= \frac{N}{\bar{Y}} [1 - \exp(-\frac{x}{\bar{Y}})]^{N-1} \exp(-\frac{x}{\bar{Y}}) \end{aligned} \quad (37)$$

$N = n_T \times n_R$ که به ترتیب تابع توزیع تجمعی (CDF) و تابع چگالی احتمال (PDF) سیگنال به نویز و N حاصل ضرب تعداد آنتن های منصوب در فرستنده و گیرنده می باشند.

۴-۱. تحلیل ظرفیت قطع در سناریوی دوم

برای محاسبه ظرفیت قطع با توجه به تعریف احتمال قطع ظرفیت داریم:

$$P_r(C < C_q^{\text{Outage}}) = q \quad (38)$$

مفهوم این احتمال این است که q درصد از زمان، ظرفیت کانال کمتر و $(1-q)$ درصد از زمان بیشتر از C_q^{Outage} خواهد بود. البته فرض می شود در طول زمان یک فریم از اطلاعات شرایط کانال ثابت باشد. بنابراین اگر از ۲۲ در ۳۸ قرار دهیم، داریم:

شرایط کانال سیستم MIMO مناسبتر (همبستگی کمتر) و برای مقادیر بیشتر از یک، شرایط کانال بدتر (همبستگی بیشتر) خواهد شد.

$$CN = \frac{\max(\sigma_i)}{\min(\sigma_i)} \quad \sigma_i = \sqrt{\lambda_i} \quad (29)$$

$$CN = \sqrt{\frac{2 + [2 + 2\cos(\pi \eta^2)]^{1/2}}{2 - [2 + 2\cos(\pi \eta^2)]^{1/2}}} \quad (30)$$

تغییرات η در مقابل تغییرات پارامتر CN در شکل ۵ شبیه سازی شده است. در این شکل مشخص است که به ازای η هایی که مقدار CN برابر یک می شود، کانال شرایط بهینه ای را دارد و $S_r S_r$ بر طبق ۱۵ ضرایب فردی از طول موج خواهد بود و به ازای ضرایب زوجی از طول موج، مقدار CN بع سمت بی نهایت میل می کند (یکی از مقادیر ویژه یا مقادیر یکنای کانال صفر شده است) و کانال MIMO-HALE-UAV شرایط نامناسبی را تجربه می کند و لازم است تا تجهیزات کنترلی مقادیر پارامترهای θ ، α ، β و ψ را تصحیح نمایند. ثالثاً تغییرات η و پارامترهای پروازی پدید سبب تغییرات ظرفیت نیز می شود. در اثر مانورها و جابه جایی ناشی از شرایط جوی مانند وزش باد (مخصوصاً در لایه استراتوسفر) و تغییر پارامترهای θ ، α ، β و ψ η ظرفیت کانال نیز دستخوش تغییر خواهد شد. این موضوع در شکل های ۶، ۷ و ۸ شبیه سازی شده است. شکل ۶ تغییرات ظرفیت، از مقدار حداقل ۷/۲۶ bps/Hz تا حداکثر ۱۳/۲۳ bps/Hz را نسبت به خطای ایجاد شده (η) را نشان می دهد. شکل ۷ تغییرات ظرفیت در برابر تغییر زاویه α و شکل ۸ این تغییر را نسبت به تغییرات زوایای β و ψ نشان می دهد.

۴. سناریوی دوم - کانال دید غیرمستقیم

اولین بارش باران در ارتفاع ۵-۲/۵ کیلومتر بالای اتمسفر شکل می گیرد بنابراین امواج الکترومغناطیس در لایه استراتوسفر مستقیماً تحت تأثیر بارش باران قرار می گیرند. افت ناشی از باران توسط یک رابطه تجربی به صورت زیر بیان می شود [۱۹]:

$$\gamma_r \left(\frac{\text{dB}}{\text{km}}\right) = a_r R_r^{b_r} \quad (31)$$

به طوری که R_r میزان بارش بر حسب میلی متر بر ساعت (mm/h) می باشد که به موقعیت جغرافیایی منطقه و a_r و b_r ضرایبی هستند که به پارامترهای فرکانس و منطقه آب و هوایی بستگی دارد. افت کلی باران برابر است با:

$$L_r = \gamma_r d_r \quad (32)$$

که در آن d_r طول مسیر باران می باشد که به هندسه مسئله بستگی خواهد داشت (شکل ۱).

$$d_r = |H_r - H_R| / \sin \theta \quad (33)$$

یکسان فرض کردن SNR ها از کانولوشنال تک‌تک توابع چگالی احتمال زیرکانال‌های سیستم MIMO به‌دست می‌آید [۲۱].

$$P_{\text{Outage}} = P(\gamma < \gamma_{\text{th}}) = F_{\gamma_{\text{th}}}(\gamma) = \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_{\text{th}}}\right)\right]^N \quad (43)$$

احتمال قطع مطابق ۴۳ تابعی از γ_{th} و $N = n_T \times n_R$ می‌باشد. شکل ۱۱ احتمال قطع SNR را برای حالات مختلف γ_{th} و $N = n_T \times n_R$ نشان می‌دهد.

۳-۴. تحلیل متوسط نرخ خطای سمبول در سناریوی دوم

معمولاً دو روش برای محاسبه ASER وجود دارد روش اول استفاده از CDF نسبت سیگنال به نویز و روش دوم استفاده از تابع مولد ممان (MGF^{20}) که در این مقاله از روش دوم استفاده می‌شود طبق تعریف MGF برابر خواهد بود با [۲۲]:

$$M_{\gamma}(z) = \int_0^{\infty} e^{-zy} f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (44)$$

که $f_{\gamma}(\gamma)$ تابع چگالی احتمال تعریف می‌شود که در ۳۶ محاسبه شد. با جایگذاری ۳۶ در ۴۳ داریم:

$$M_{\gamma}(z) = \int_0^{\infty} e^{-zy} \frac{N}{\gamma} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right)\right]^{N-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right) d\gamma \quad (45)$$

فرم بسته انتگرال فوق با استفاده از [۱۸] به‌صورت ۴۶ است:

$$M_{\gamma}(z) = \frac{N}{\gamma} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(-1)^k \binom{N-1}{k}}{z + \frac{k+1}{\gamma}} \quad (46)$$

با محاسبه MGF می‌توان متوسط احتمال خطا را برای مدولاسیون‌های مختلف به‌دست آورد که در این مقاله برای مدولاسیون‌های فاز (MPSK) به‌صورت ۴۷ تعریف می‌شود [۲۲] که در آن $\phi = (M-1)\pi/M$ ، $g_{\text{MPSK}} = \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)$ و M مرتبه مدولاسیون می‌باشد؛ بنابراین با استفاده از رابطه ۴۶ داریم:

$$\bar{P}_e = \frac{1}{\pi} \int_0^{\phi} M_{\gamma}\left(\frac{g_{\text{MPSK}}}{\sin^2(\theta)}\right) d\theta \quad (47)$$

برای انتگرال ۴۸ می‌توان فرم بسته‌ای به‌دست آورد که در نهایت متوسط احتمال خطای سمبول برابر خواهد شد با:

$$\bar{P}_e = N \sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k \binom{N-1}{k} \frac{1}{1+k} \frac{M-1}{M} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \frac{M}{(M-1)\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \cos \frac{\pi}{M}\right) \right] \right\} \quad (48)$$

$$\beta = \frac{\bar{\gamma} g_{\text{MPSK}}}{1+k}$$

$$P_r(2\log_2(1+2\gamma) < C_q^{\text{Outage}}) = q \Rightarrow P_r\left(\gamma < \frac{2^{C_q^{\text{Outage}/2} - 1}}{2}\right) = q \quad (39)$$

سیگنال به نویز طبق ۳۷ PDF این احتمال با توجه به اینکه

محاسبه شده برابر است با:

$$P_r\left(\gamma < \frac{2^{C_q^{\text{Outage}/2} - 1}}{2}\right) = \int_0^{\frac{2^{C_q^{\text{Outage}/2} - 1}}{2}} \frac{N}{\gamma} \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{\gamma}\right)\right]^{N-1} \exp\left(-\frac{x}{\gamma}\right) dx = q \quad (40)$$

و در نهایت ظرفیت قطع از حل انتگرال ۴۰ به‌دست خواهد آمد:

$$C_q^{\text{Outage}} = 2 \left(\log_2 2\bar{\gamma} \ln \frac{1}{1 - q^{1/N}} + 1 \right) \quad (41)$$

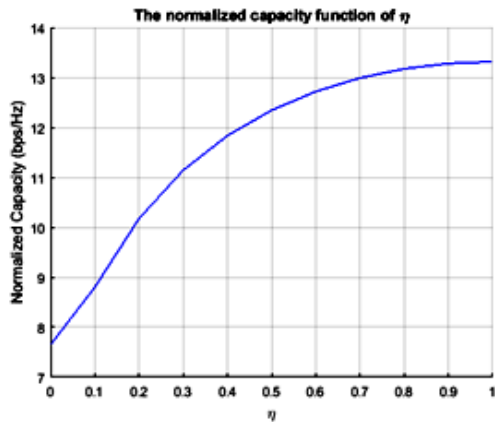
ظرفیت قطع محاسبه‌شده در ۴۱ در شکل ۹ رسم شده است و برای صحنه‌گذاری محاسبات با نتیجه شبیه‌سازی مطابقت داده شده است. از ۳۶، CCDF یا $P_r(C > C_q^{\text{Outage}})$ به‌دست می‌آید که شاخص مناسبی برای نشان دادن وضعیت ظرفیت کانال در شرایط مختلف جوی (باران) می‌باشد:

$$P_r(C > C_q^{\text{Outage}}) = 1 - P_r(C < C_q^{\text{Outage}}) = 1 - \left[1 - \exp\left(-\frac{2^{C_q^{\text{Outage}/2} - 1}}{\gamma}\right)\right]^N \quad (42)$$

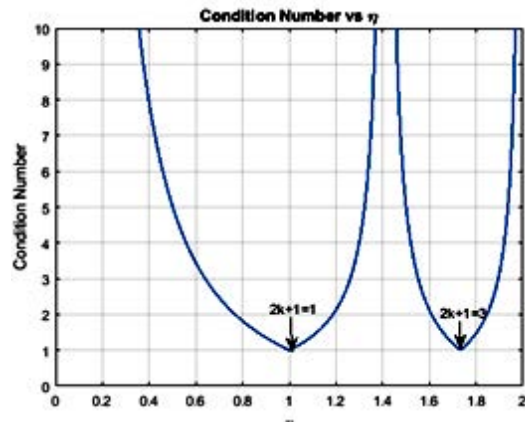
با استفاده از رابطه به‌دست آمده برای $P_r(\text{Capacity} > R)$ و برای مقادیر مشخص P_r ، G_r ، G_f و f تابع توزیع مکمل تجمعی (CCDF) ظرفیت یعنی احتمال اینکه ظرفیت کانال از ظرفیت قطع بیشتر شود، برای نرخ‌های مختلف ریزش باران (I_r متفاوت) در شکل ۱۰ شبیه‌سازی شده است.

۲-۴. تحلیل احتمال قطع SNR در سناریوی دوم

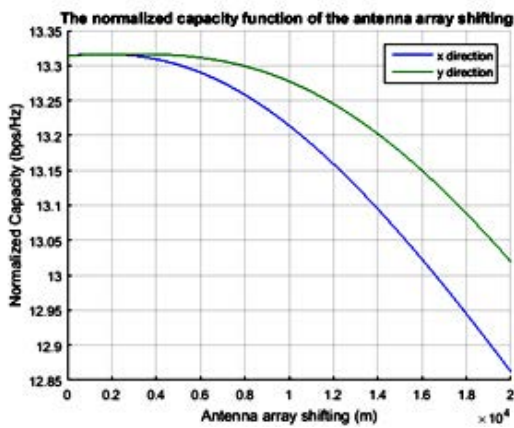
احتمال قطع، یک کمیت آماری مهم برای ارزیابی کیفیت سرویس ارائه‌شده در شبکه‌های ارتباطاتی بی‌سیم می‌باشد و از منظر ریاضی به‌صورت احتمال اینکه نسبت سیگنال به نویز انتها به انتها (SNR-e) از یک سطح آستانه مشخص کمتر باشد، تعریف می‌شود که همان تعریف CDF می‌باشد [۲۲]. برای محاسبه CDF سیگنال به نویز لازم است ابتدا PDF این متغیر برای سناریوی دوم محاسبه شود لذا با توجه به اینکه h_{ij} گوسی و مختلط با توزیع رایلی فرض شده، بنابراین توزیع $\text{SNR} = \frac{P_T}{\sigma^2} |h_{ij}|^2$ توام آن با فرض



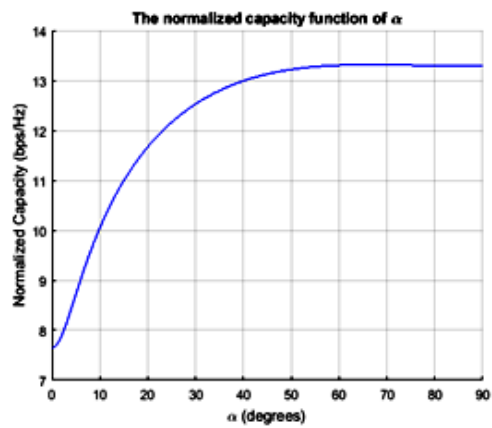
شکل ۶. تغییرات ظرفیت نسبت به ضریب خطای η



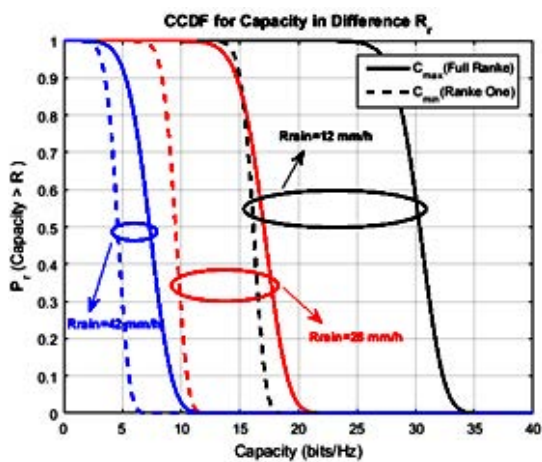
شکل ۵. تغییرات η در مقابل CN ماتریس کانال



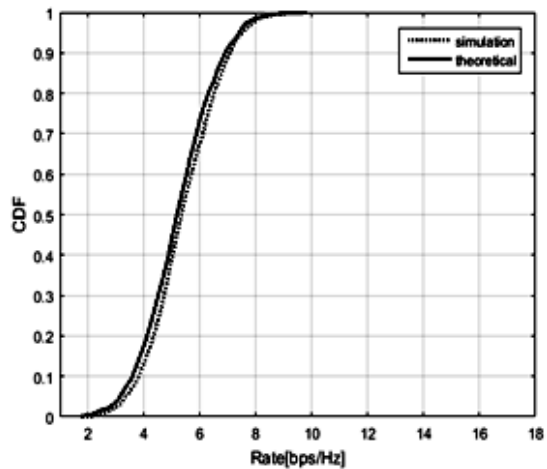
شکل ۸. تغییرات ظرفیت نسبت به جابه‌جایی آرایه آنتن‌ها در راستای محور X و Y (تغییرات زوایای Ψ و β)



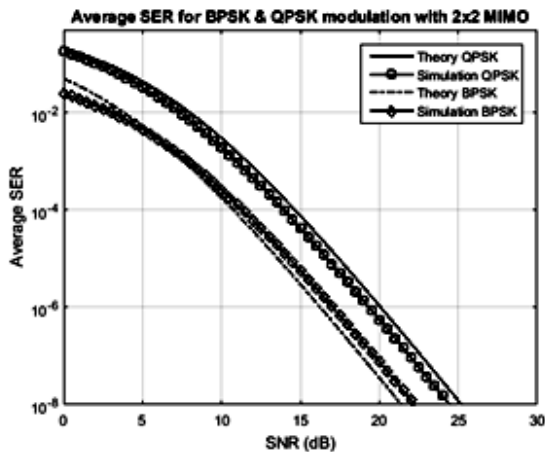
شکل ۷. تغییرات ظرفیت نسبت به زاویه α



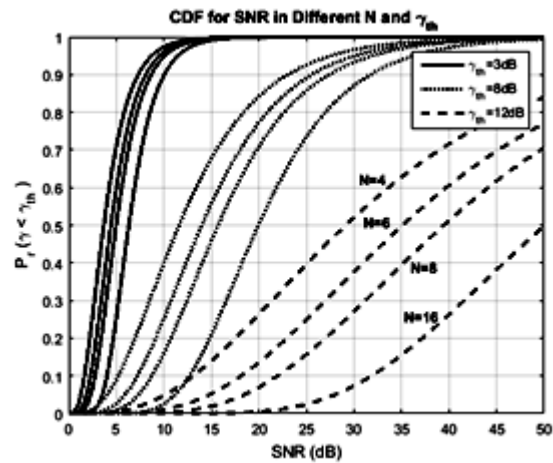
شکل ۱۰. تابع توزیع مکمل تجمعی ظرفیت بیشینه و کمینه برای $R_r=12\text{mm/h}$ و $R_r=28\text{mm/h}$ ، $R_r=42\text{mm/h}$



شکل ۹. ظرفیت قطع شبیه‌سازی و تئوری



شکل ۱۲. متوسط احتمال خطای سمبول برای مدولاسیون‌های BPSK و QPSK



شکل ۱۱. تغییرات احتمال قطع SNR به ازای $N=n_t \times n_r$ و γ_{th} مختلف

پایش ضریب خطای η و تغییرات جهت‌گیری‌های زوایای آنتن‌ها فرستنده و گیرنده بود. لذا پیشنهاد می‌شود برای افزایش برد از مخابرات مشارکتی^{۲۱} (رله) استفاده شود و ضریب خطا و همچنین زوایای آنتن‌ها، توسط تجهیزات پردازشی و محاسباتی منصوب روی پهپاد کنترل شود. در ادامه برای سناریوی دوم شرایط جوی؛ یعنی ریزش باران را شرکت داده و با انتخاب کانال فیدینگ رایلی، ظرفیت قطع، احتمال قطع و احتمال خطای کانال را محاسبه و شبیه‌سازی کردیم که نتیجه آن تخمین میزان کیفیت کانال در این شرایط بر اساس معیارهای به‌دست آمده بود. مثلاً نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با افزایش نرخ ریزش باران و کاهش متوسط SNR و در نهایت کاهش ضریب راسین کانال (Kr) اثر کانال دیدغیرمستقیم (H_{NLOS}) بیشتر شده که سبب کاهش ظرفیت کانال دیدمستقیم (H_{LOS}) خواهد شد و در نتیجه با احتمال ۵۰ درصد ظرفیت کانال در حالت مرتبه کامل بیشتر از ۱۹٫۷ و ۳۰ (b/s/Hz) و بیشتر از ۵، ۱۰ و ۱۶ (b/s/Hz) در حالت مرتبه یک کانال خواهد بود. همچنین تابع احتمال خطا (SER) برای مدولاسیون‌های BPSK و QPSK برای حالات تئوری و شبیه‌سازی در سناریوی دوم پهپاد HALE به‌دست آمد که نتایج صحت تحلیل‌های ریاضی انجام‌شده را نشان می‌دهد.

شکل ۱۲ متوسط نرخ خطای سمبول برای دو مدولاسیون BPSK و QPSK را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود در حالت بارش باران برای داشتن متوسط احتمال خطای $ASER=10^{-6}$ برای مدولاسیون QPSK نسبت به مدولاسیون BPSK به حدود 4dB سیگنال به نویز بیشتری در گیرنده نیاز خواهیم داشت. در این شکل نتایج تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی جهت صحت‌گذاری بر تحلیل‌های تئوری مقایسه شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد کانال ارتباطی بین ایستگاه زمینی و یک پهپاد ارتفاع بلند چندآنتنی، با در نظر گرفتن شرایط جوی (باران) تحلیل و بررسی شد. در این رهگذر دو سناریوی مختلف؛ یعنی هوای صاف (کانال دید مستقیم) و هوای بارانی (کانال دید غیرمستقیم)، مورد بررسی قرار گرفت. در سناریوی اول پارامترهای پروازی که روی تعامد زیرکانال‌ها اثرگذار بودند استخراج و رابطه آنها برای بیشترین و کمترین ظرفیت کانال محاسبه و نشان داده شد که ظرفیت محاسبه‌شده بیشینه و بهینه می‌باشد؛ زیرا از سایر ظرفیت‌های حالات کانال (رایلی و تک ورودی-تک خروجی) بیشتر می‌باشد. الزامات طراحی که در این سناریو باید در نظر گرفت، محدودیت برد مخصوصاً در فرکانس‌های پایین،

۶. مأخذ

[1] A. Aragón Zavala , J. L. Cuevas Ruíz , J. A. Delgado Penín, *High Altitude Platforms for Wireless Communications*, New York, USA: John Wiley & Sons, Dec.2008.
[2] A. K. Widiawan , R. Tafazolli, High Altitude Platform Station (HAPS): A Review of New

Infrastructure Development for Future Wireless Communications, *Wireless Personal Communications*, vol. 42, no. 3, pp. 387-404, Aug 2007.

- [3] David Grace, Mihael Mohorčič, *Broadband Communications via High Altitude Platforms*, John Wiley & Sons Ltd.2011.
- [4] L. Jamison, G. S. Sommer, I. R. Porche, High Altitude Airships for the Future Force Army, *Technical Report 234*, RAND Arroyo Center, Jan. 2005.
- [5] Ioannis Sarris, Andrew R. Nix, Design and Performance Assessment of High-Capacity MIMO Architectures in the Presence of a Line-of-Sight Component, *IEEE Transaction on Vehiclor Technology*, Vol. 56, No. 4, July 2007
- [6] Emmanouel T. Michailidis, Athanasios G. Kanatas, Capacity Optimized Line-of-Sight HAP-MIMO Channels for Fixed Wireless, IWSSC 2009, International Workshop on Satellite and Space Communications.
- [7] H. Aamir, U. I. Qamar, MIMO channel modeling for integrated high altitude platforms, geostationary satellite/land mobile satellite and wireless terrestrial networks, *J. Space Technol*, vol. 3, 2013, pp. 19–26.
- [8] E. Falletti, F. Sellone, C. Spillard, D. Grace, transmit and receive multi-antenna channel model and simulator for communications from high altitude platforms, *Int. J. Wirel. Inf. Netw*, vol. 13, 2006, pp. 59–75.
- [9] T. Hult, A. Mohammed, Compact MIMO Antennas and HAP Diversity for Enhanced Data Rate Communications , In Proceedings of the IEEE 65th Vehicular Technology Conference, Dublin,Ireland, 22–25 April 2007, pp. 1385-1389.
- [10] T. Hult, A. Mohammed, Z. Yang, D. Grace, Performance of a multiple HAP system employing multiple polarization, *Wirel. Pers. Commun.* Vol. 52, 2010, pp. 105–117.
- [11] Feihong Dong, Min Li, Xiangwu Gong, Hongjun Li, Fengyue Gao, Diversity Performance Analysis on Multiple HAP Networks, *Sensors-Open Access Journal*, 2015
- [12] J. L. Cuevas-Ruíz , J. A. Delgado-Penín, Channel model based on semi-Markovian processes, an approach for HAPS systems, in Proc. XIV InternationalConference on Electronics, Communications, and Computers, 2004,
- [13] S. Iskandar, Shimamoto, Channel haracterization and performance evaluation of mobile communication employing stratospheric platforms, *IEICE Transactions on Communications*, vol. E89-B, no. 3, pp. 937-944, Mar. 2006.
- [14] F. Dovis, R. Fantini, M. Mondin, P. Savi, “Small-scale fading for high-altitude platform (HAP) propagation channels, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 641-647, Apr. 2002.
- [15] E. T. Michailidis, A. G. Kanatas, Three-Dimensional HAP-MIMO Channels: Modeling and Analysis of Space-Time Correlation, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 5, pp. 2232-2242, Jun. 2010.
- [16] A. G. Zajić, G. L. Stüber, Three-dimensional modeling, simulation, and capacity analysis of space-time correlated mobile-to-mobile channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 2042-2054, Jul. 2008.
- [17] A. Paulraj, R. Nabar, D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [18] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, Table of Integrals, Series and Products, 6th ed. San Diego: CA, Academic Press, 2000.
- [19] Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, ITU-R P.838-1, 1997.
- [20] H. Xu, T. S. Rappaport, R. J. Boyle, J. H. Schaffner, Measurements and models for 38-GHz point-to-multipoint radiowave propagation, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, pp. 310-321, Apr. 2000.
- [21] J. G. Proakis, M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed., McGraw Hill Higher Education, 2008.
- [22] M. K. Simon, M. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, Nov. 2004.

-
1. MIMO-HALE
 2. near space
 3. Cloud Computing and Storage
 4. large scale distributed networks
 5. internet of things
 6. 5G
 7. wireless sensor networks
 8. high altitude long endurance
 9. high altitude platform
 10. multi input-multi output
 11. rich scattering
 12. indoor
 13. virtual-MIMO
 14. symbol error rate
 15. single input-single output
 16. full rank
 17. ranko
 18. eigen value
 19. condition number
 20. singular value
 21. cooperative communication