دهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران
تهران، ۱۲- ۱۰ اسفند ماه ۱۳۸۹

تعیین مجموعه دستورات تله‌کامند ماهواره با قابلیت اطمینان بالا

رضا امیدی[۱]،کریم محمدی[۲]
۱- دانشگاه علم و صنعت ایران (rezaomidi@iust.ac.ir)
۲- دانشگاه علم و صنعت ایران (mohammadi@iust.ac.ir)

چکیده

در سیستم‌های ماهواره‌ای همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها اطمینان از صحت تبادل اطلاعات می‌باشد. شاید مهم‌ترین داده‌ها، دستورات زیرسیستم تله‌کامند می‌باشد که برای کنترل ماهواره از طریق ایستگاه زمینی استفاده می‌شود. انتخاب بهترین مجموعه دستور حتی پیش از اجرای تکنیک‌های مقاوم‌سازی ضروری می‌باشد. در این مقاله نشان خواهیم داد انتخاب درست مجموعه دستورات خام به طور متوسط، ۳۶ درصد در قابلیت اطمینان موثر است الگوریتم‌هایی جهت تعیین قابلیت اطمینان بر اساس تزریق تصادفی خطا و همچنین محاسبه قابلیت اطمینان مجموعه دستورات ارائه خواهد شد این الگوریتم‌ها قادر به تعیین مناسب‌ترین مجموعه می‌باشند.

واژه های کلیدی: *تله‌کامند، فاصله همینگ، قابلیت اطمینان*

مقدمه

زیرسیستم تله‌کامند در ماهواره‌ها از مهم‌ترین واحدها است که مفسر و مجری دستورات ارسال شده از ایستگاه زمینی می‌باشد. این زیرسیستم بسته به ماموریت و چگونگی کنترل ماهواره تقریبا با تمام قسمت‌های ماهواره درگیر می‌باشد. کنترل اتوماتیک یا کنترل تحت نظر ایستگاه زمینی، به واسطه این واحد انجام می‌شود. مجموعه دستورات کنترلی به صورت رشته بیت‌های صفر و یک بوده که طول این رشته وابسته به تعداد دستورات می‌باشد و حتی ممکن است چند بیت برای توسعه‌های آینده به صورت یدکی در نظر گرفته شود. با توجه به حساسیت زیرسیستم تله‌کامند، در بخش سخت‌افزار، نرم‌افزار و جریان داده آن تکنیک‌های مقاوم‌سازی انجام می‌شود. از جمله این تکنیک‌ها در حوزه سخت‌افزار استفاده از برد پشتیبان، افزونگی سه ماژولی و در حوزه نرم‌افزار کدگذاری و غیره اشاره کرد. جریان داده مربوط به دستورات تله‌کامند از حساس‌ترین بخش‌هایی است که رخداد خطا در آن ممکن است مشکل‌ساز باشد به عنوان نمونه اجرای ناخواسته دستور تصویر برداری به جای دستور تله‌متری وضعیت توان ماهواره- تحت شرایطی که وضعیت باطری مساعد نباشد- ممکن است تغذیه کنترل وضعیت و حتی خود تله‌کامند را مختل کند و باعث اختلال در عملکرد ماهواره شود. بنابراین اطمینان از عدم اجرای دستورات ماهواره به جای یکدیگر در شرایط رخداد خطا الزامی است. هر چند برای این منظور تکنیک‌های مبتنی بر کدینگ و افزونگی جهت تشخیص و تصحیح خطا در رشته انجام می‌شود اما در این مقاله نشان خواهیم داد انتخاب مناسب مجموعه دستورات خام- پیش از اعمال تکنیک‌های مقاوم‌سازی- به طور متوسط، ۳۶ درصد در افزایش قابلیت اطمینان موثر می‌باشد. الگوریتم‌هایی مبتنی بر محاسبات آمار و احتمال و همچنین تزریق تصادفی خطا جهت تعیین بهترین مجموعه دستور خام ارائه خواهد شد. این الگوریتم‌ها برای حالت‌هایی استفاده از تکنیک مقاوم‌سازی قابل بسط هستند تا تاثیر تکنیک‌های مقاوم‌سازی در راستای رسیدن به مجموعه دستورات خام نیز لحاظ شود [۱][۴-۵]. در ادامه می‌خوانید: مسیر داده تله‌کامند و رشته دستور خام، فاصله همینگ در رشته دستور، الگوریتم تزریق تصادفی خطا، الگوریتم محاسبه قابلیت اطمینان، نتایج شبیه‌سازی‌ها و جمع‌بندی.

مسیر داده تله‌کامند و رشته دستور خام

رشته دستور ارسالی از ایستگاه زمینی به ماهواره مسیر نشان داده شده در شکل ۱ را طی می‌کند. دستورات خام در ایستگاه زمینی با استفاده از روش‌های کدینگ و افزونگی سه گانه اطلاعات مقاوم‌سازی می‌شوند و سپس به فرستنده ایستگاه زمینی جهت مدولاسیون و مخابره تحویل داده می‌شوند. پس از عبور دستور مقاوم‌سازی و مدوله شده از کانال بی‌سیم در طرف ماهواره توسط گیرنده ماهواره دریافت و دمدوله و دیکد می‌گردد تا دستور خام استخراج شود حتی برای افزایش بیشتر قابلیت اطمینان این عمل دایورسیتی (تکرار چند باره ارسال دستور) می‌شود. رخداد خطا در رشته دستور- تبدیل صفر به یک و برعکس- در هر یک از بخش‌های این مسیر ممکن است رخ دهد و متناسب با طراحی بخش‌های مختلف، این احتمال متفاوت می‌باشد. نکته مهم اینکه طول رشته دستور خام به طور مستقیم به تعداد دستورات اصلی و تعداد دستورات رزرو بستگی دارد اما ممکن است برای ایجاد کدینگ استاندارد یا فریم‌های خاص چند بیت به آن اضافه شود. به عنوان نمونه فرض کنید ماهواره‌ای ۵۶ دستور دارد برای کدینگ روش BCH با قابلیت اصلاح دو خطا در نظر گرفته شده باشد با فرض چند جمله‌ای پایه $g(x)=x^4+x+1$ به کدینگ BCH(15,7) خواهیم رسید طول داده‌های ورودی هفت بیت است در حالی که با ۶ بیت $۶۴=۲^۶$ می‌توان ۵۶ دستور را پشتیبانی کرد پس علاوه بر یک بیت کامل بخشی از فضای قابلیت ۶۴ نسبت به نیاز ۵۶ دستوری آزاد می‌باشد با در نظر گرفتن طول رشته دستور ۷ بیتی قابلیت ۷۲ دستور به قوت خود باقی است. بنابراین وجود بیت‌های خالی و یا بیت‌هایی که به طور کامل از ظرفیت آنها استفاده نشده است این امکان را ایجاد می‌کند که از یک مجموعه دستور قابل دسترس، به تعداد مورد نیاز انتخاب انجام شود به عنوان نمونه دیگر در ماهواره‌ای که تعداد کل دستورات اصلی و رزرو ۶۵ دستور باشد حداقل تعداد بیت‌های لازم جهت تشکیل رشته دستور تله‌کامند هفت بیت

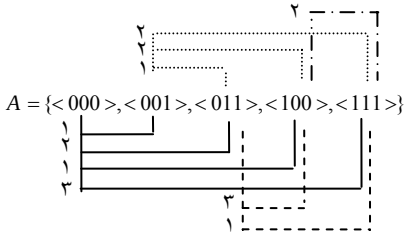
(2^7=۱۲۸) می‌باشد با هفت بیت می‌توان ۱۲۸ دستور ایجاد کرد. در حالی که تنها ۶۵ دستور مورد نیاز می‌باشد حال اگر شرایط کدینگ و فریم‌بندی مستلزم افزودن یک بیت به رشته دستور باشد در این صورت مجموعه دستورات قابل انتخاب به (2^8=۲۵۶) افزایش پیدا می‌کند در این شرایط انتخاب ۶۵ دستور از بین ۲۵۶ دستور مطرح است. هدف ما در این مقاله تعیین تاثیر انتخاب مناسب مجموعه دستورات بر قابلیت اطمینان می‌باشد همچنین در این مقاله الگوریتم‌هایی برای این منظور ارائه خواهد شد.

فاصله همینگ در رشته دستور

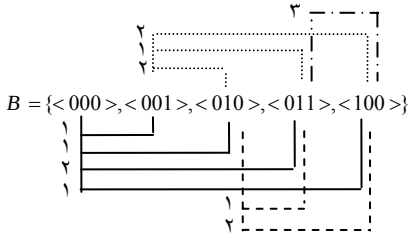
فاصله همینگ عبارت است اختلاف صفر و یک‌های دو رشته بیت نسبت به همدیگر مثلا فاصله همینگ رشته بیت 001 و 101 برابر یک می‌باشد. هر چه فاصله همینگ بیشتر باشد تعداد واژگونی‌های بیشتری نیاز است تا یک رشته دستور به دیگری تبدیل شود. این مسئله پایه و اساس روش‌های کدینگ می‌باشد که در آنها با افزایش فاصله همینگ قابلیت تشخیص و تصحیح خطا را افزایش می‌دهند به طور کلی برای تشخیص k بیت خطا حداقل فاصله همینگ k+1 نیاز است همچنین برای اصلاح k بیت خطا فاصله همینگ بین دو رشته باید به 2k+1 افزایش یابد[۲][۶-۷]. فاصله گذاری همینگ پایه و اساس روش-های کدینگ می‌باشد و هر یک از روش‌های کدینگ با تنظیم مناسب فاصله همینگ قابلیت اصلاح و یا تشخیص خطا را در خود ایجاد می‌کند. واضح است که فاصله همینگ حداقل بین دو رشته بیت یک می‌باشد افزودن یک بیت اضافی این فاصله را به دو می‌رساند در نتیجه قابلیت تشخیص یک خطا ایجاد می‌شود (این بیت همان بیت پریتی است که برای تشخیص یک خطا استفاده می‌شود). حال وجود ۲ بیت رزرو یا بیت‌هایی که از ظرفیت آنها به طور کامل استفاده نشده است بسته به طول رشته بیت دستور قابلیت تشخیص تعداد خطای بیشتر و حتی اصلاح خطا را افزایش خواهد داد هر چه طول رشته دستور بیشتر باشد دستیابی به قابلیت اصلاح و تشخیص خطا با تعداد بیت‌های رزرو کم و بیت‌هایی که از ظرفیت آنها به طور کامل استفاده نشده کمتر می-شود. به عبارت دیگر متوسط فاصله همینگ بین دو عدد صحیح قرار می‌گیرد فرض کنید تعداد دستورات لازم برابر ۵ باشد در این صورت حداقل سه بیت برای تفکیک بین دستورات نیاز می‌باشد. اما با سه بیت 2^3=۸ دستور می‌توان تولید کرد انتخاب ۵ دستور از بین ۸ دستور ممکن به تعداد ترکیب ۵ از ۸ مجموعه را شامل می‌شود. دو مجموعه از دستورات نمونه در زیر آمده است (مجموعه دستورات A و مجموعه B).

$$A = \{<000>,<001>,<011>,<100>,<111>\}$$
$$B = \{<000>,<001>,<010>,<011>,<100>\}$$

هر یک از دو مجموعه A و B شرط تعداد ۵ تایی دستورات را ارضا می‌کنند همچنین حداقل فاصله همینگ در هر دو مجموعه نیز برابر با یک است بنابراین استفاده از هر دو مجموعه قابلیت تشخیص خطا را ایجاد نمی‌کند- برای تشخیص یک خطا حداقل فاصله همینگ ۲ لازم است-. برای تعیین متوسط فاصله همینگ بین دستورات در هر یک از دو مجموعه مذکور فاصله همینگ دو به دو دستورات را متوسط‌گیری می‌کنیم بنابراین داریم:



$$\text{Avrage of Hamming Distance in } \{A\} = \frac{1+2+1+3+2+2+1+3+1+2}{10} = 1.8$$



$$\text{Avrage of Hamming Distance in } \{B\} = \frac{1+1+2+1+2+1+2+1+2+3}{10} = 1.6$$

چنانچه محاسبات نشان می‌دهد متوسط فاصله همینگ در دو مجموعه یکسان نیست. این اختلاف در رشته بیت‌های بزرگتر و تحت شرایط وجود بیت‌های یدکی برای توسعه‌های آینده متفاوت می‌باشد. اگر متوسط فاصله همینگ به عنوان معیار تعیین مجموعه دستور العمل قرار داده شود تا چه اندازه در افزایش قابلیت اطمینان موثر خواهد بود. برای این منظور ابتدا الگوریتم محاسبه احتمال خرابی در رشته بیت ارائه خواهد شد سپس الگوریتمی جهت مدل‌سازی تزریق خطا در مجموعه‌ها مطرح می‌شود تا نتایج الگوریتم محاسباتی ارزیابی شود.

محاسبه احتمال خرابی در رشته بیت دستور

برای تعیین احتمال خرابی در رشته دستور فرضیات زیر در نظر گرفته شده است-برخی از این فرضیات در سایر مراجع نیز [۳] آمده است-

- رخداد خطا دارای توزیع یکنواخت باشد و احتمال آن در هر یک از بیت‌ها برابر است.
- تبدیل یک دستور به دستور قابل قبول دیگر به عنوان خرابی فرض شده است. (تبدیل دستور به دستور نامعتبر معادل عدم اجرای آن می‌باشد پس در این حالت تشخیص خطا مطرح است.)
- تنها یک واژگونی بیت در رشته دستور رخ دهد (برای حالت‌های بیش از یک رخداد واژگونی الگوریتم‌های ارائه شده قابل تعمیم می‌باشند).

با این فرضیات دو دستور که فاصله همینگ آنها یک می‌باشد مستعد تبدیل به همدیگر هستند و با تعیین این سری از دستورات در مجموعه دستورات می‌توان قابلیت اطمینان را تعیین کرد. برای حالتی که بیش از یک واژگونی مثلا N واژگونی در رشته بیت مد نظر باشد تعیین تعداد فاصله همینگ کوچکتر یا مساوی N نیاز می‌باشد. البته در این حالت مدل تاثیر واژگونی نیز قابل بررسی است این مدل‌ها واژگونی بیت واژگون شده را نیز در محاسبات

وارد می‌کنند[۳]. برای تعیین تعداد دستوراتی که در مجموعه دستور کلی $\{C_1,C_2,C_3,\ldots C_{n-1},C_n\}$ فاصله همینگ یک دارند، ماتریس فاصله همینگ را به صورت زیر تشکیل می‌دهیم:

$$\begin{array}{c} \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ . \\ . \\ . \\ C_{n-1} \\ C_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & C_3 & . \ . \ . & C_{n-1} & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & x & x & . \ . \ . & x & x \\ H_{21} & 0 & x & . \ . \ . & x & x \\ H_{31} & H_{32} & 0 & . \ . \ . & x & x \\ . & . & . & . \ . \ . & . & . \\ . & . & . & . \ . \ . & . & . \\ . & . & . & . \ . \ . & . & . \\ H_{(n-1)1} & H_{(n-1)2} & H_{(n-1)3} & . \ . \ . & 0 & x \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & . \ . \ . & H_{n(n-1)} & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

در ماتریس همینگ هر درایه نشان‌دهنده فاصله همینگ دستور iام با دستور jام می‌باشد- i و j بین یک تا n تغییر می‌کنند- از آنجایی که هر دستور با خودش فاصله همینگ ندارد بنابراین درایه‌های روی قطر اصلی صفر خواهد بود. همچنین با توجه به اینکه فاصله دستور iام از دستور jام با فاصله دستور jام از دستور iام برابر است بنابراین نیمه بالایی یا پایینی ماتریس مشابه بوده و تعیین یکی از آنها کافی است. خرابی در رشته بیت دستور زمانی رخ می‌دهد که حداقل یکی از دو دستوری که فاصله همینگ یک دارند انتخاب شود و واژگونی دقیقا در بیت خاص- که با تغییر آن دستوری به دستور دیگر تبدیل می‌شود- انجام شود. این احتمال از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_f = \frac{2 \sum_{i,j \in [1:n]} H_{ij}\big|_{H_{ij}=1}}{\beta \bullet \Phi} \qquad (۱)$$

صورت کسر نشان دهنده دو برابر مجموع یک‌های ماتریس فاصله همینگ می‌باشد β نشان دهنده تعداد بیت‌های رشته دستور و Φ تعداد دستورات را نشان می‌دهد. اگر دو برابر مجموع یک‌های ماتریس فاصله همینگ را با نماد S نشان دهیم داریم:

$$S = 2 \sum_{i,j \in [1:n]} H_{ij}\big|_{H_{ij}=1} \qquad (۲)$$

نتیجه رابطه ۱ معیار قابلیت اطمینان برای یک مجموعه دستور در نظر گرفته شده است و در تعیین بهترین (B) و بدترین (W) مجموعه دستور متناسب با تعداد دستورات مورد نیاز و تعداد بیت‌های اختصاص داده شده استفاده می‌شود. طبق این رابطه احتمال خرابی در مجموعه دستورالعمل با افزایش تعداد دستورات با فاصله همینگ یک بیشتر می‌شود همچنین احتمال خرابی با طول رشته دستور و تعداد دستورات رزرو شده نسبت عکس دارد. هر اندازه تعداد بیت‌های رشته دستور یا فضای رزرو بیشتر باشد احتمال خرابی کمتر خواهد بود. برای اطمینان از نتایج رابطه ارائه شده در ادامه الگوریتم شبیه‌سازی تزریق خطا ارائه خواهد شد و نتایج رابطه مذکور با نتایج الگوریتم تزریق خطا مقایسه گردیده است.

الگوریتم تعیین قابلیت اطمینان مجموعه دستورالعمل

الگوریتم تزریق خطا، در واقع شبیه‌سازی رخداد خطا در طول لینک می‌باشد. این خطا ممکن است در هر یک از بخش‌های ایستگاه زمینی، کانال مخابراتی یا طرف گیرنده (ماهواره) رخ دهد. با توجه به فرض مطرح شده در محاسبات، رخداد یک خطا را مدل‌سازی می‌کنیم. به طور مختصر این الگوریتم عبارت است از:

۱- مقدار دهی اولیه و دریافت مجموعه دستورالعمل

۲- انتخاب تصادفی یک دستور از مجموعه دستورالعمل

۳- انتخاب یک بیت تصادفی از دستور انتخاب شده

۳-۱- اگر بیت انتخاب شده یک است به صفر تغییر بده

۳-۲- اگر بیت انتخاب شده صفر است به یک تغییر بده

۴- مجموعه دستورالعمل خطا دار- که در مرحله سوم ایجاد شده- را با مجموعه دستور العمل اصلی مقایسه کن

۴-۱- اگر دستور خطا دار با یکی از دستورات تطابق دارد به شمارنده حالت‌های خطا یک واحد اضافه کن

۵- تکرار الگوریتم متناسب با تعداد مجموعه دستورالعمل‌ها یک الی ده میلیون بار.

نکته مهم در الگوریتم بالا تعداد تکرارهای زیاد است دلیل این امر احتمالی بودن این روش است برای اینکه به احتمال واقعی برسیم تعداد تکرار را افزایش می‌دهیم. برای مجموعه‌های کوچکتر یک میلیون تکرار کافی است اما با افزایش تعداد دستورات مجموعه، تعداد تکرارها را به ده میلیون افزایش می‌دهیم. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۲ اختلاف نتایج رابطه ارائه شده و الگوریتم تزریق خطا ناچیز می‌باشد که با افزایش تعداد تزریق این اختلاف به صفر کاهش می‌یابد البته روش تزریق خط نسبت به الگوریتم استفاده از رابطه (۱) کندتر می‌باشد به همین جهت در ادامه نتایج صرفا بر مبنای رابطه (۱) ارائه شده است.

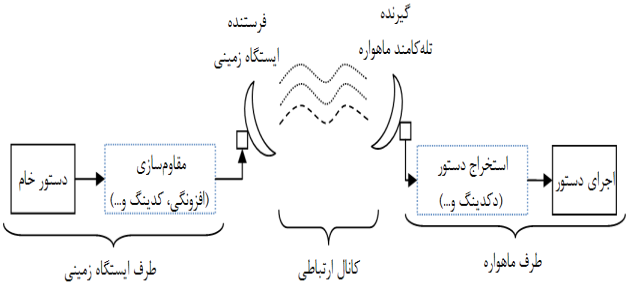
نتایج شبیه‌سازی و جمع‌بندی

نتایج شبیه‌سازی، به ازای تعداد دستورات و تعداد بیت‌های مختلف در جدول ۱ نشان دهنده احتمال خرابی در بهترین مجموعه $P_f(B)$ و بدترین مجموعه $P_f(W)$ و درصد اختلاف آنها می‌باشد. در جدول ۱ نماد β نشان‌دهنده تعداد بیت‌های اختصاص داده شده به دستورات می‌باشد بنابراین 2^β دستور امکان‌پذیر است تعداد دستورات مطلوب $\Phi = 2^{\beta-1}+1$ فرض شده است یعنی تنها یک دستور بیش از تعداد دستورات رشته $\beta-1$. در صورتی که تعداد دستورات مطلوب افزایش یابد با توجه به کاهش متوسط فاصله همینگ اختلاف احتمال خرابی بین بهترین و بدترین مجموعه کاهش می‌یابد. افزودن تعداد بیت‌های رزرو به بیت‌های در نظر گرفته شده متوسط فاصله همینگ و طبق رابطه ۱ احتمال خرابی بهترین و بدترین مجموعه را متاثر خواهد کرد. برای تعیین این تاثیرگذاری پارامترهای جدول ۱ تحت شرایطی که بیت‌های رزرو در نظر گرفته شده باشد شبیه‌سازی شده است و نتایج در شکل ۳ آمده است. با توجه به شکل ۳ معلوم می‌شود که افزودن بیت‌های رزرو باعث افزایش اختلاف تحمل‌پذیری خطا در بین مجموعه دستورات مختلف خواهد شد.

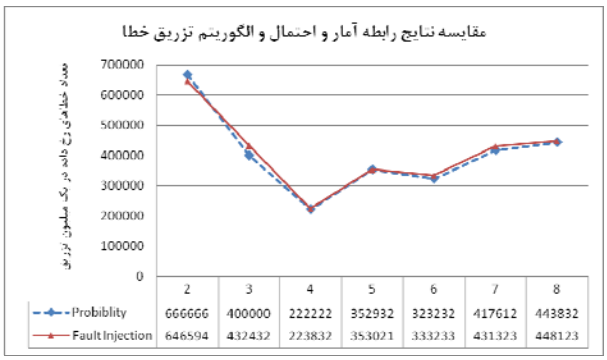
به طور خلاصه در این مقاله، تاثیر انتخاب مجموعه دستورالعمل خام تله‌کامند بر قابلیت اطمینان داشتن لینک ایمن بررسی گردید با مبنا قرار دادن فاصله همینگ الگوریتمی برای ارزیابی قابلیت اطمینان ارائه گردید همچنین اعتبارسنجی نتایج الگوریتم ارائه شده با روش مدل‌سازی تزریق خطا ارزیابی شد. نتایج به دست آمده نشان داد در حالتی که از ظرفیت رشته بیت به طور کامل استفاده نشده است بین بهترین و بدترین مجموعه دستورالعمل به طور متوسط ۳۶ درصد اختلاف قابلیت اطمینان وجود دارد این درصد با اضافه شدن تعداد بیت‌های رزرو افزایش می‌یابد.

جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی به ازای تعداد دستورات و تعداد بیت‌های مختلف

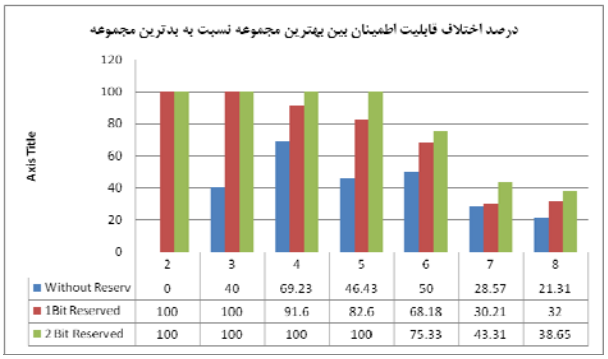
S_B	S_W	Φ	B	$P_f(B)$	$P_f(W)$	درصد اختلاف
2	2	3	2	0.6667	0.6667	0.00
3	5	5	3	0.4000	0.6667	40.00
4	13	9	4	0.2222	0.7222	69.23
15	28	17	5	0.3529	0.6588	46.43
32	64	33	6	0.3232	0.6465	50.00
95	133	65	7	0.4176	0.5846	28.57
229	291	129	8	0.4438	0.5640	21.31



شکل ۱: مسیر سیر دستور در سیستم‌های ماهواره‌ای



شکل ۲: مقایسه نتایج رابطه آمار و احتمال و الگوریتم تزریق خطا



شکل ۳: درصد اختلاف قابلیت اطمینان بین بهترین مجموعه نسبت به بدترین مجموعه

مراجع

1. Addaim, A.; Kherras, A.; "*Design of a Telecommand and Telemetry System for use on Board a Nanosatellite*"; IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2007, PP: 455 – 458.
2. A. Israel Koren and B. C.Mani Kirishna, "*Fault Tolerant Systems*", Elsevier, Page(s): 55-108, 2007.
3. A. J.A.Maestro and B. P.Reviriego; *"Reliability of Single-Error Correction Protected Memories"*, IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY, VOL. 58, NO. 1, MARCH 2009.
4. Ortiz, A.; Munilla, J.; Peinado, A.; "*Secure wireless data link for low-cost telemetry and telecommand applications*", Electrotechnical Conference, 2006. MELECON 2006. IEEE Mediterranean, Page(s): 828 – 831.
5. Lei Zhang; Spinsante, S.; Quan Zhang; Chaojing Tang; " *Security enhancement for space telecommand link"*, Conference on Information, Communications and Signal Processing, ICICS 2009. Page(s): 1 – 5.
6. Fujino, M.; Moshnyaga, V.G.; "*An efficient Hamming distance comparator for low-power applications*", Electronics, Circuits and Systems, 2002. 9th International Conference on , , Page(s): 641 - 644 vol.2.
7. Pappalardo, F.; Pennisi, M.; Motta, S.; Calonaci, C.; Mastriani, E.; "*HAMFAST: Fast Hamming Distance Computation*", Computer Science and Information Engineering, 2009 WRI World Congress on , Page(s): 569 – 572.