

بهبود کارایی سیستم مخابراتی انتقال داده در ماهواره‌های سنجش از دور LEO براساس کنترل توان و نرخ ارسال

علی پاینده (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

محمدرضا عارف (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

سیستم مخابراتی انتقال داده یکی از سیستم‌های اساسی در ماهواره‌های سنجش از دور است. ماهواره‌های مدار پایین (LEO) نسبت به زمین موقعیت ثابتی ندارند. بنابراین برقراری ارتباط با آنها فقط در ناحیه‌ی دید ایستگاه زمینی میسر است. از طرف دیگر، فاصله‌ی ماهواره‌ی LEO از ایستگاه زمینی دریافت در مدت برقراری ارتباط دائماً در حال تغییر است. اما از آنجا که اتصال مخابراتی ماهواره‌های LEO معمولاً برای بدترین شرایط (حداکثر فاصله ماهواره از ایستگاه زمینی و بدترین شرایط آب و هوایی) محاسبه و طراحی می‌شود، در شرایط بهتر مقداری از توانایی سیستم انتقال داده هدر می‌رود. در این نوشتار، پس از مدل‌سازی کانال، براساس کنترل توان و نرخ ارسال با تغییر فاصله روشی برای بهبود فرایند انتقال داده در ماهواره‌های LEO ارائه می‌شود. در این روش سعی می‌شود احتمال خطای بیت (و به تعبیر دیگر میزان SNR دریافتی) در تمام زمان برقراری ارتباط ثابت بماند. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی، بهبود زیاد در عملکرد سیستم مخابراتی انتقال داده را نمایان می‌سازند.

مقدمه

مخابراتی ماهواره‌های LEO معمولاً برای بدترین شرایط (حداکثر فاصله ماهواره از ایستگاه زمینی و بدترین شرایط آب و هوایی) محاسبه و طراحی می‌شود، در نتیجه در شرایط بهتر مقدار زیادی از توانایی سیستم انتقال داده هدر می‌رود. برای بهبود کارایی سیستم انتقال داده در ماهواره‌ها، کارهای انجام شده عموماً بر پایه‌ی تطبیق فرستنده با شرایط محیطی قرار دارند. با استفاده از روش‌های مختلف کدکردن توأم منبع-کانال^۳، سیستم انتقال داده ماهواره با حالت کانال وفق داده شده است.^[۱-۵] با استفاده از روش‌های کنترل نرخ و توان ارسال به منظور تطبیق با شرایط محیطی، می‌توان عملکرد سیستم انتقال داده را بهبود بخشید.^[۶-۸] نکته‌ی مهم در این روش‌ها، لزوم اخذ اطلاعات مربوط به شرایط محیطی اطراف ایستگاه زمینی دریافت در مدت زمان برقراری ارتباط و تخمین حالت کانال است. فاصله‌ی ماهواره‌ی LEO از ایستگاه زمینی دریافت در مدت برقراری ارتباط دائماً در حال تغییر است. با توجه به ارتفاع مدار و موقعیت ایستگاه زمینی دریافت، فاصله‌ی ماهواره از گیرنده در مدت برقراری ارتباط، و در هر لحظه از زمان، توسط فرستنده به‌سادگی قابل محاسبه است. بنابراین، با استفاده از روش کنترل نرخ و توان ارسال براساس تغییر فاصله و بدون نیاز به وجود بازخورد از گیرنده به فرستنده و تخمین حالت کانال، می‌توان فرایند انتقال داده را بهبود

امروزه عملاً تمام پهنه‌ی گیتی زیر پوشش شبکه‌های ماهواره‌های مخابراتی و سنجشی قرار دارد، و این شبکه‌ها جایگاهی بس عظیم در زمینه‌های مختلف ارتباطی، زمین‌شناسی، پیش‌بینی وقایع غیرمترقبه، نظامی و غیره یافته‌اند. اگر چه با پیشرفت علم و فناوری، تغییرات فراوانی در ساختار سیستم مخابراتی ماهواره‌ها ایجاد شده است، اما تا دست‌یابی به یک سیستم مخابراتی با کارایی بهینه هنوز راه زیادی باقی مانده است.

از نظر میزان آگاهی فرستنده از وضعیت گیرنده و شرایط کانال، سیستم‌های مخابراتی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱. سیستم‌های مخابراتی هوشمند: فرستنده از وضعیت گیرنده و شرایط کانال مطلع است و می‌تواند از این معلومات جهت تطبیق خویش بهره بگیرد.
۲. سیستم‌های مخابراتی غیرهوشمند: فرستنده از وضعیت گیرنده و شرایط کانال اطلاعی ندارد و هیچ‌گونه تطبیقی در فرستنده انجام نمی‌شود، نظیر مخابرات رادیو تلویزیونی (یک به چند) و مخابرات سیار.

سیستم مخابراتی انتقال داده در ماهواره‌های سنجش از دور LEO را می‌توان به سیستم مخابراتی هوشمند تبدیل کرد. اتصال

$$L_{ADD} \cong b + \frac{c}{\sin\beta}$$

که در آن:

b و c کمیت‌های تابع شرایط محیطی و مشخصات آنتن زمینی (مستقل از β)

$$P_N = 10 \log(KT_{\Sigma} \Delta f)$$

T_{Σ} کل دمای نویز گیرنده (برحسب $^{\circ}K$)
 Δf پهنای باند کانال انتقال

یک تقریب خوب برای دمای نویز گیرنده برحسب زاویه‌ی فراز به صورت زیر است:

$$T_{\Sigma} \cong d + \frac{e}{\sin\beta}$$

که در آن:

d و e کمیت‌های تابع شرایط محیطی و مشخصات گیرنده (LNA، موج بر، آنتن)

$$\Delta f = \frac{BR}{PSKR \times FECR}$$

BR نرخ بیت ارسال داده

PSKR ضریب مدولاسیون (بیت بر سمبل)

FECR نرخ کدکردن کانال

با جایگذاری روابط تقریبی در رابطه‌ی ۱ و ساده‌سازی آن خواهیم داشت:

$$SNR \cong P_{ST} + A + 2 \log(\sin\beta) - \frac{B}{\sin\beta} - 10 \log BR \quad (2)$$

احتمال خطای بیت تابعی از SNR است:

$$SNR \geq \gamma \rightarrow P_e \leq \alpha$$

$$SNR = 10 \log\left(\frac{BR}{\Delta f} \times \frac{E_b}{N_s}\right) = 10 \log \frac{E_b}{N_s} + 10 \log \frac{BR}{\Delta f}$$

چنان که مشاهده می‌شود نسبت سیگنال به نویز در ورودی گیرنده برای یک سیستم مخابراتی مشخص تابعی از نرخ ارسال، توان ارسال، شرایط محیطی و فاصله است.

میزان انرژی مصرفی فرستنده در یک ناحیه‌ی رؤیت ماهواره با طول زمانی T و با فرض ثابت بودن توان ارسال، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W = \frac{P_{ST} \times T}{\eta_T}$$

که در آن η_T بازده تقویت‌کننده‌ی توان فرستنده (معمولاً حدود ۲۵٪) است. [۱۰] همچنین حجم کل داده‌های دریافتی در یک ناحیه‌ی رؤیت

بخشید. در این روش، هدف آن است که کیفیت قابل قبول داده‌ها (نسبت توان سیگنال به توان نویز دریافتی) در تمام مدت رؤیت ماهواره ثابت باقی بماند.

در ادامه، مدلی برای کانال ماهواره‌ای LEO ارائه و مسئله‌ی کنترل نرخ و توان ارسال با تغییر فاصله تشریح می‌شود و سپس در بخش‌های بعدی روش‌های کنترل نرخ و توان ارسال با تغییر فاصله مورد بررسی قرار می‌گیرند. و در پایان نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری آورده می‌شوند.

توصیف مسئله و مدل‌سازی کانال ماهواره‌ی LEO

برای محاسبه‌ی نسبت سیگنال به نویز (SNR) در ورودی گیرنده‌ی زمینی از رابطه زیر استفاده می‌شود: [۹]

$$SNR = P_{ST} + G_{SA} - L_{SUM} + G_{EA} - P_N \quad (1)$$

که در آن:

P_{ST} توان فرستنده ماهواره

G_{SA} بهره‌ی آنتن فرستنده ماهواره

L_{SUM} کل تلفات مسیر انتقال

G_{EA} بهره‌ی آنتن گیرنده‌ی زمینی

P_N کل توان نویز در ورودی گیرنده‌ی زمینی

$$L_{SUM} = L_s + L_{ADD} + \eta$$

که در آن:

L_s تلفات فضای آزاد

L_{ADD} کل تلفات ناشی از شرایط محیطی

η کل تلفات موج‌برهای فرستنده و گیرنده

$$L_s = 10 \log \frac{16\pi^2 R^2}{\lambda^2} = a - 2 \log(\sin\beta)$$

که در آن:

R فاصله‌ی ماهواره از ایستگاه زمینی

a یک کمیت ثابت وابسته به فرکانس کار، ارتفاع مدار و ارتفاع ایستگاه زمینی

β زاویه‌ی فراز

$$R = \frac{H-h}{\sin\beta}$$

که در آن:

H ارتفاع مدار

h ارتفاع ایستگاه زمینی از سطح دریا

یک تقریب خوب برای تلفات ناشی از شرایط جوی برحسب زاویه‌ی فراز به صورت زیر است:

$$c_1 = P_{ST_{dB}} + A - SNR, c_2 = 10^{\frac{c_1}{10}}, c_3 = \frac{B}{10}$$

در این صورت، حجم کل داده‌های ارسالی در یک ناحیه‌ی رؤیت ماهواره با طول زمانی T، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V = \int_0^T BR(\beta) dt = \int_{\theta_1}^{180-\theta_2} BR(\beta) \frac{T}{180-2\theta} d\theta$$

که در آن:

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{H-h}{\sqrt{(H+R_E)^2 + R_E^2 - 2(H+R_E)R_E \sin \theta}} \right)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{(H+R_E)^2 + R_E^2 - (H-h)^2}{2(H+R_E)R_E \sin^2(\beta_1)} \right)$$

$R_E \cong 6378 \text{ km}$ شعاع کره زمین

β حداقل زاویه‌ی فراز بر حسب درجه

عملکرد این سیستم انتقال داده را با سیستم پایه (BR_0 و P_{ST_0}).

طراحی شده به‌ازای بدترین حالت، مقایسه می‌کنیم:

حالت اول: انرژی مصرفی یکسان با سیستم پایه ($W=W_0$). در این

حالت حجم داده‌های ارسالی سیستم انتقال داده نسبت به سیستم پایه

بیشتر خواهد بود. درصد این افزایش را می‌توان با رابطه‌ی زیر

سنجید:

$$\Delta V = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100$$

$$V_0 = BR_0 \times T$$

حالت دوم: حجم کل داده‌های ارسالی یکسان با سیستم پایه

($V=V_0$). در این حالت می‌توان توان ارسال جدیدی (P_{ST}) را که از

P_{ST_0} بسیار کم‌تر خواهد بود (صرفه‌جویی در انرژی مصرفی)

محاسبه کرد:

$$\begin{cases} P_{ST_{dB}} = 10 \log BR(\beta) - SNR + A - 20 \log(\sin \beta) + \frac{B}{\sin \beta} \\ V = V_0 = BR_0 \times T \end{cases}$$

درصد کاهش انرژی مصرفی فرستنده در یک ناحیه رؤیت ماهواره

نسبت به سیستم پایه عبارت است از:

$$\Delta W = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100 = \frac{P_{ST_0} - P_{ST}}{P_{ST_0}} \times 100$$

$$W_0 = \frac{P_{ST_0} \times T}{\eta_T}$$

ماهواره با طول زمانی T و با فرض ثابت بودن نرخ ارسال، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V = BR \times T$$

چنان‌که در رابطه‌ی ۲ مشاهده می‌شود فاصله و شرایط محیطی تأثیر قابل ملاحظه‌ی بر عملکرد سیستم مخابراتی انتقال داده در ماهواره‌های سنجش از دور LEO دارند. چگونه می‌توان تأثیر این دو پارامتر را بر عملکرد سیستم مخابراتی کاهش داد؟ برای این منظور دو راهکار متصور است:

۱. بهبود سیستم انتقال داده براساس تطبیق با شرایط محیطی، که

مستلزم اخذ اطلاعات مربوط به شرایط محیطی اطراف ایستگاه

زمینی دریافت در مدت برقراری ارتباط و تخمین حالت کانال

می‌باشد. این روش مورد توجه بسیاری از محققین بوده است.

۲. بهبود سیستم انتقال داده براساس تطبیق با تغییر فاصله، که مستلزم

اخذ اطلاعات مربوط به شرایط محیطی اطراف ایستگاه زمینی

دریافت در مدت برقراری ارتباط نیست.

برای راهکار دوم روش‌های زیر پیشنهاد می‌شوند:

۱. کنترل نرخ ارسال با تغییر فاصله؛

۲. کنترل توان ارسال با تغییر فاصله؛

۳. کنترل توأم نرخ و توان ارسال با تغییر فاصله.

در این روش‌ها سعی می‌شود با ثابت نگه‌داشتن حداقل کیفیت

قابل قبول داده‌ها در تمام مدت برقراری ارتباط، بر کارایی سیستم

انتقال داده افزوده شود. اگرچه در این سه روش مفهوم کدکردن توأم

منبع-کانال به‌وضوح دیده نمی‌شود، می‌توان این روش‌ها را نیز

نوعی کدکردن توأم در ارسال داده دانست، زیرا با تغییر نرخ یا توان

ارسال در حقیقت میزان حفاظت داده‌ها در برابر نویز کانال تغییر یافته

و نوعی انطباق با کانال انجام می‌شود.

کنترل نرخ ارسال با تغییر فاصله

با فرض بدترین شرایط جوی (تعیین ضرایب A و B به‌ازای بدترین

شرایط محیطی) و ثابت بودن توان ارسال، و به‌ازای حداکثر احتمال

خطای بیت معلوم $P_e = \alpha$ ، می‌خواهیم در تمام مدت برقراری ارتباط

مقدار SNR در ورودی گیرنده ثابت بماند؛ در این صورت باید نرخ

ارسال فرستنده‌ی ماهواره براساس رابطه‌ی زیر با فاصله تغییر کند:

$$10 \log BR(\beta) = c_1 + 20 \log(\sin \beta) - \frac{B}{\sin \beta}$$

$$\Rightarrow BR(\beta) = c_1 \sin^2(\beta) \times 10^{\frac{-c_2}{\sin \beta}}$$

که در آن:

حالت دوم: حجم کل داده‌های ارسالی یکسان با سیستم پایه $(V=V_0)$. در این حالت میزان انرژی مصرفی نسبت به سیستم پایه کاهش می‌یابد.

درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی در یک ناحیه‌ی رؤیت ماهواره عبارت است از:

$$\Delta W = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100$$

در مقایسه با روش تغییر نرخ ارسال، روش تغییر توان ارسال می‌تواند عملکرد بهتر و امکان پیاده‌سازی عملی ساده‌تری داشته باشد.

کنترل توان و نرخ ارسال با تغییر فاصله

یکی از مشکلات اساسی در دوروش فوق، دامنه‌ی زیاد تغییرات نرخ ارسال یا توان ارسال است. با ترکیب این دوروش، علاوه بر بهره‌گیری از مزایای هر دو روش، می‌توان به دامنه‌ی تغییرات کم‌تری در نرخ و توان ارسال دست یافت.

با فرض بدترین شرایط جوی (تعیین A و B به ازای بدترین شرایط محیطی) و به ازای احتمال خطای بیت مشخص $P_e = \alpha$ ، می‌خواهیم با تغییر توان و نرخ ارسال، مقدار SNR در ورودی گیرنده در تمام مدت برقراری ارتباط ثابت بماند:

$$SNR = P_{ST_{dB}}(\beta) + A + 2 \cdot \log(\sin\beta) - \frac{B}{\sin\beta} - 10 \cdot \log BR(\beta) \Rightarrow$$

$$BR(\beta) = C \times P_{ST}(\beta) \sin^2(\beta) \times 10^{\frac{-D}{\sin\beta}}$$

$$C = 10^{\frac{A-SNR}{10}}, D = \frac{B}{10}$$

ممکن است معیارهای زیر به منظور بهینه‌سازی عملکرد سیستم انتقال داده به کار روند:

$$\text{Min } \Delta BR \triangleq \frac{BR_{\text{Max}} - BR_{\text{Min}}}{BR_{\text{Min}}} \text{ or } \frac{dBR(\beta)}{d\beta}$$

$$\text{Min } \Delta P_{ST} \triangleq \frac{P_{ST_{\text{Max}}} - P_{ST_{\text{Min}}}}{P_{ST_{\text{Min}}}} \text{ or } \frac{dP_{ST}(\beta)}{d\beta}$$

$$\text{Min } W = \int_0^T P_{ST}(\beta) dt$$

$$\text{Max } V = \int_0^T BR(\beta) dt$$

از آنجا که توان ارسال و انرژی مصرفی سیستم انتقال داده از جمله عوامل مهم و مؤثر محدودکننده در طراحی (وزن و ابعاد) هر ماهواره‌اند، حالت دوم (حجم ثابت داده‌های ارسالی) از اهمیت بیشتری می‌تواند برخوردار باشد. البته تغییر پیوسته‌ی نرخ و فاصله‌ی زیاد بین کم‌ترین و بیشترین نرخ، معضل بزرگی را در طراحی و ساخت یک سیستم مخابراتی عملی ایجاد می‌کنند. یک روش برای کاهش این مشکل، تغییر پله‌ی نرخ ارسال با فاصله است که تا حدودی از عملکرد سیستم می‌کاهد. در هر حال، تغییر نرخ خود نوعی به‌هدر رفتن پهنای باند و امکانات سخت‌افزاری موجود را به همراه دارد.

کنترل توان ارسال با تغییر فاصله

با فرض بدترین شرایط جوی (تعیین A و B به ازای بدترین شرایط محیطی) و ثابت بودن نرخ ارسال و به ازای احتمال خطای بیت مشخص $P_e = \alpha$ ، می‌خواهیم در تمام مدت برقراری ارتباط، مقدار SNR در ورودی گیرنده ثابت بماند. در این صورت باید توان ارسال فرستنده‌ی ماهواره بر اساس رابطه زیر با فاصله تغییر کند:

$$P_{ST_{dB}}(\beta) = SNR - A + 10 \cdot \log(BR) - 20 \cdot \log(\sin\beta) + \frac{B}{\sin\beta}$$

در این صورت، کل مصرف انرژی در یک ناحیه‌ی رؤیت ماهواره با طول زمانی T برابر است با:

$$W = \frac{1}{\eta_T} \int_0^T P_{ST}(\beta) dt = \frac{1}{\eta_T} \int_{\theta_0}^{180-\theta_0} P_{ST}(\beta) \frac{T}{180-2\theta_0} d\theta$$

عملکرد این سیستم انتقال داده را با سیستم پایه $(P_{ST_0}$ و BR_0)، طراحی شده به ازای بدترین حالت، مقایسه می‌کنیم:

حالت اول: انرژی مصرفی یکسان با سیستم پایه $(W=W_0)$. در این حالت می‌توان نرخ ارسال جدیدی (BR) را که از BR_0 بسیار بیشتر خواهد بود (افزایش حجم داده‌های ارسالی) محاسبه کرد:

$$\begin{cases} 10 \cdot \log BR = P_{ST_{dB}} + A + 20 \cdot \log(\sin\beta) - \frac{B}{\sin\beta} \\ W = W_0 = \frac{P_{ST_0} \times T}{\eta_T} \text{ با شرط} \end{cases}$$

درصد افزایش حجم داده‌های ارسالی در یک ناحیه‌ی رؤیت ماهواره نسبت به سیستم پایه عبارت است از:

$$\Delta V = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100 = \frac{BR - BR_0}{BR_0} \times 100$$

در این حالت، با یک مسئله‌ی بهینه‌سازی مواجه نخواهیم بود:

$$V = \int_{\theta_1}^{\theta_2} BR(\beta) dt = V_0 \Rightarrow \int_{\theta_1}^{180-\theta_2} \frac{B}{10^{\frac{a_1}{\sin\beta}}} d\theta =$$

$$\frac{(180-\theta_2)\pi}{180} BR_0 \times 10^{\frac{-a_1}{10}} \Rightarrow a_1 \quad \text{معلوم}$$

برای بهبود بیشتر عملکرد می‌توان سهم جبران تلفات فضای آزاد و تلفات شرایط محیطی با کمک نرخ ارسال و توان ارسال را تغییر داد:

$$10 \log BR(\beta) = 10 a_1 + 20 a_2 \log(\sin\beta) + \frac{10 a_3}{\sin\beta} \Rightarrow$$

$$BR(\beta) = 10^{a_1} \times \sin^{2a_2}(\beta) \times 10^{\frac{a_3}{\sin\beta}}$$

و یکی از مسائل بهینه‌سازی زیر را حل کرد:

• **Min W** با شرط: $BR(\beta) = 10^{a_1} \times \sin^{2a_2}(\beta) \times 10^{\frac{a_3}{\sin\beta}}$, $V = V_0$

• **Min ΔP_{ST}** با شرط: $BR(\beta) = 10^{a_1} \times \sin^{2a_2}(\beta) \times 10^{\frac{a_3}{\sin\beta}}$, $V = V_0$

• **Min ΔBR** با شرط: $BR(\beta) = 10^{a_1} \times \sin^{2a_2}(\beta) \times 10^{\frac{a_3}{\sin\beta}}$, $V = V_0$

این مسائل را می‌توان با روش ضرایب لاگرانژ و نیز استفاده از روش‌های عددی حل کرد.

پ) تغییر پله‌ی نرخ ارسال و تغییر پیوسته‌ی توان ارسال در هر پله با تغییر فاصله: پیاده‌سازی عملی یک سیستم انتقال داده با تغییر پیوسته‌ی نرخ ارسال بسیار دشوار است. برای رفع این مشکل می‌توان مسیر مشاهده‌ی ماهواره از ایستگاه زمینی را به تعداد قطعات کوچک‌تر تقسیم کرده و با تعیین یک نرخ ارسال مناسب برای هر قطعه از مسیر، برای جبران تغییرات فاصله در هر قطعه، از تغییر پیوسته‌ی توان ارسال بهره گرفت. تعیین بهینه‌ی تعداد قطعات (x)، مقادیر نرخ‌های ارسال $\{BR_1, BR_2, \dots, BR_M\}$ و فواصل زمانی قطعات $\{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_x\}$ مستلزم حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی پیچیده است:

Min W (or ΔP_{ST}) با شرط: $V = V_0$,

$BR_{Min} \leq BR_i \leq BR_{Max}$ $i = 1, 2, \dots, x$

در حالت کلی، برای دستیابی به سیستم انتقال داده‌ی بهینه باید مسئله‌ی بهینه‌سازی زیر حل شود:

$$\begin{cases} \text{Min } \Delta BR, \text{ Min } \Delta P_{ST}, \text{ Min } W, \text{ Max } V \\ \text{با شرط: } BR(\beta) = C P_{ST}(\beta) \sin^2(\beta) \times 10^{\frac{-D}{\sin\beta}} \end{cases}$$

بهینه‌سازی همزمان هر چهار پارامتر $\{\Delta BR, \Delta P_{ST}, W, V\}$ ، به دلیل وجود وابستگی میان آنها و رفتارهای متضاد، بسیار دشوار است.

برای ساده‌سازی مسئله‌ی بهینه‌سازی فوق باید از یک سری فرضیات معقول بهره گرفت. به منظور مقایسه‌ی عملکرد این سیستم انتقال داده با سیستم پایه (BR_0, P_{ST}) ، با فرض یکسان بودن حجم داده‌های ارسالی ($V = V_0$)، حل مسئله بهینه‌سازی فوق را در چهار حالت مورد بررسی قرار می‌دهیم:

الف) تغییرات نرخ ارسال کم‌تر از یک سطح آستانه (ξ)، و تغییرات توان ارسال کم‌تر از یک سطح آستانه (ξ): اگر محدوده‌ی تغییرات نرخ و توان ارسال از یک حد معینی بیشتر باشد، معمولاً باید تدابیر خاصی در مورد سخت‌افزار و پهنای باند (و احتمالاً تغییر باند فرکانسی) در نظر گرفته شود. لذا فرض معقول آن است که محدوده‌ی تغییرات نرخ ارسال $(BR_{Min} \leq BR(\beta) \leq BR_{Max})$ و توان ارسال $(P_{ST_{Min}} \leq P_{ST}(\beta) \leq P_{ST_{Max}})$ از قبل انتخاب و تعیین شود. در این حالت، مسئله‌ی بهینه‌سازی به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$\begin{cases} \text{با شرط: } BR(\beta) = C P_{ST}(\beta) \sin^2(\beta) \times 10^{\frac{-D}{\sin\beta}}, \\ V = V_0, \Delta BR \leq \xi, \Delta P_{ST} \leq \xi \end{cases}$$

حل نظری این مسئله ساده نیست؛ با استفاده از روش‌های عددی و جست و جوی فراگیر می‌توان برای $P_{ST}(\beta)$ یا $BR(\beta)$ به جوابی دست یافت.

ب) جبران تغییرات ناشی از تلفات محیطی با تغییر نرخ و تغییرات ناشی از تلفات فضای آزاد با تغییر توان ارسال: در ساده‌ترین شکل، می‌توان تابع تغییرات نرخ ارسال را چنین در نظر گرفت:

$$10 \log BR(\beta) = a_1 - \frac{B}{\sin\beta} \Rightarrow BR(\beta) = 10^{a_1 - \frac{B}{\sin\beta}}$$

$$P_{ST}(\beta) = \frac{1}{\sin^2(\beta)} \times 10^{\frac{(SNR - A + a_1)}{10}}$$

که در آن:

$$W = \int_0^T \frac{P_{ST}(\beta)}{\eta_T} dt = \frac{1}{\eta_T} \sum_{i=1}^x \int_{\theta_i + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\theta_j}^{\theta_i + \sum_{j=1}^i \Delta\theta_j} P_{ST}^{(i)}(\beta) \frac{T}{180 - 2\theta_i} d\theta$$

$$BR^{(i)} = CP_{St}^{(i)}(\beta) \sin^2(\beta) \times 10^{\frac{-D}{\sin\beta}}$$

$$BR^{(i)} \in \{BR_1, BR_2, \dots, BR_M\}$$

$$V = \int_0^T BR(\beta) dt = \sum_{i=1}^x \int_{\theta_i + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\theta_j}^{\theta_i + \sum_{j=1}^i \Delta\theta_j} BR^{(i)} \frac{T}{180 - 2\theta_i} d\theta = \frac{T}{180 - 2\theta_i} \sum_{i=1}^x \Delta\theta_i \times BR^{(i)}$$

برای سادگی می‌توان مقادیر x و BR_i ها را معلوم و فواصل زمانی قطعات را با هم مساوی ($\Delta\theta = \Delta\theta_1 = \dots = \Delta\theta_x$) فرض کرد، در این صورت مسئله عبارت خواهد بود از تعیین نرخ ارسال مناسب برای هر قطعه از مسیر، به نحوی که با قید $V = V_c$ حداقل انرژی مصرف شود:

$$\text{Min } W = \frac{T}{(180 - 2\theta_i)\eta_T} \sum_{i=1}^x BR^{(i)} \times$$

$$\int_{\theta_i + (i-1)\Delta\theta}^{\theta_i + i\Delta\theta} \frac{1}{C \sin^2(\beta)} \times 10^{\frac{D}{\sin\beta}} d\theta$$

$$\text{با شرط: } T \sum_{i=1}^x BR^{(i)} = V_c \times$$

(ت تغییر پهنای باند و توان ارسال: این حالت عملی‌ترین روش بهبود عملکرد سیستم انتقال داده در ماهواره‌های سنجنش از دور LEO است. فرض کنیم M نرخ ارسال $\{BR_1, BR_2, \dots, BR_M\}$ و N توان ارسال $\{P_{ST1}, P_{ST2}, \dots, P_{STN}\}$ توسط سیستم انتقال داده قابل تأمین باشند. مسئله عبارت است از تعیین مقادیر نرخ و توان ارسال در هر یک از فواصل زمانی $\{\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_x\}$ ، به نحوی که به‌ازای $V = V_c$ حداقل انرژی مصرف شود:

$$\text{Min } W \text{ با شرط: } V = V_c, BR^{(i)} = CP_{ST}^{(i)} \sin^2(\beta_i) \times$$

$$10^{\frac{D}{\sin\beta_i}} \quad i = 1, 2, \dots, x$$

که در آن:

$$BR^{(i)} \in \{BR_1, BR_2, \dots, BR_M\}$$

$$P_{ST}^{(i)} \in \{P_{ST1}, P_{ST2}, \dots, P_{STN}\}$$

بدیهی است که هر چه مقادیر $\{M, N, x\}$ بزرگ‌تر باشند، می‌توان بهبود بیشتری در عملکرد سیستم انتقال داده به دست آورد.

نتایج شبیه‌سازی‌های عددی

به منظور بررسی عملکرد سیستم انتقال داده با تغییر فاصله و شرایط محیطی، بودجه‌ی اتصال مخابراتی ماهواره-زمین را در بهترین حالت^۵ و بدترین حالت^۶ برای یک کاربرد عملی محاسبه می‌کنیم: مشخصات کلی سیستم:

$$f = 1/\sqrt{6}\text{GHz}, H = 150\text{km}, h = 2\text{km}, \eta = 1\text{dB}, \eta_T = 0/25,$$

$$T = 60\text{sec}, \text{FECC} = 1, \text{BPSK Modulation}, 10^\circ \leq \beta \leq 170^\circ$$

$$G_{SA} = 2\text{dB}, G_{EA} = 29\text{dB} (D_{EA} = 2\text{m} \text{ قطر})$$

پارامترهای اصلی سیستم:

$$BR_c = 5/3\text{Mbps}, p_{ST} = 5\text{w}$$

مقادیر محاسبه شده:

$$L_{ADD}: 0/5\text{dB}(\beta = 90^\circ) - 4/0\text{dB}(\beta = 10^\circ)$$

$$L_{SUM}: 15\text{dB}(\beta = 90^\circ) - 17\text{dB}(\beta = 10^\circ)$$

$$T_{\Sigma}: 187\text{k}(\beta = 90^\circ) - 210\text{k}(\beta = 10^\circ)$$

$$P_N: -138/6\text{dB}(\beta = 90^\circ) - 138/1\text{dB}(\beta = 10^\circ)$$

$$\text{SNR}: 19/6\text{dB}(\beta = 90^\circ) - 0/1\text{dB}(\beta = 10^\circ)$$

میزان تأثیر شرایط محیطی بر اختلاف بین بدترین و بهترین حالات در حدود ۴ دسی‌بل است که خود تابعی از فاصله است. میزان تأثیر تغییر فاصله بر کل تلفات مسیر در حدود ۱۵/۵ دسی‌بل است.

با فرض گوسی، سفید و جمع‌پذیر بودن نویز (AWGN)، نرخ خطای بیت در بهترین و بدترین حالات به‌صورت زیر خواهد بود:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{\gamma E_b}{N_0}}\right) \Rightarrow \begin{cases} P_e \approx 0, \beta = 90^\circ \text{ (best case)} \\ P_e \approx 0/1, \beta = 10^\circ \text{ (worst case)} \end{cases}$$

برای دست‌یابی به احتمال خطای $P_e \leq 10^{-6}$ در بدترین حالت باید نرخ ارسال را کم یا توان ارسال را بیشتر کرد:

$$P_e \leq 10^{-6} \Rightarrow \frac{E_b}{N_0} \geq 10\text{dB} \Rightarrow \text{SNR} \geq 10\text{dB} \Rightarrow \begin{cases} P_{ST} \approx 49\text{w} \text{ یا} \\ BR \approx 542\text{KHz} \end{cases}$$

بهبود عملکرد با کنترل توان ارسال

- در حالت انرژی مصرفی یکسان با سیستم پایه ($W=W_0$):

$$P_{ST}(\beta) = \frac{V/6 \times 10^{-V}}{\sin^2(\beta)} \times 10^{\frac{-0.074}{\sin\beta}} \times BR$$

$$W = W_0 = 117/6 \text{ kw} \Rightarrow BR \cong 11 \text{ Mbps} \Rightarrow$$

$$P_{ST}: V/1w \sim 1.03/9w$$

$$\frac{\text{Max } P_{ST}(\beta=10^\circ)}{\text{Min } P_{ST}(\beta=90^\circ)} \cong 14/6, \Delta V = \frac{BR - BR_0}{BR_0} \times$$

$$100 \cong 10.7/6\%$$

در این حالت، نسبت حداکثر توان ارسال به حداقل توان ارسال برابر ۱۴/۶ و درصد افزایش حجم داده‌های ارسال در حدود ۱۰.۷/۶٪ است. در حالت حجم داده‌های ارسال یکسان با سیستم پایه ($V=V_0$):

$$BR_0 = 5/3 \text{ Mbps},$$

$$W_0 = 117/6 \text{ kw} \Rightarrow P_{ST}(\beta) \cong \frac{4}{\sin^2(\beta)} \times 10^{\frac{-0.074}{\sin\beta}}$$

$$P_{ST}: 3/4 \sim 49/1w \Rightarrow \frac{\text{Max } P_{ST}(\beta=10^\circ)}{\text{Min } P_{ST}(\beta=90^\circ)} \cong 14/6$$

$$W = \frac{1}{0.725} \int_{48/5}^{131/5} P_{ST}(\beta) \frac{600}{180-2\theta} d\theta \cong 56/1 \text{ kw} \Rightarrow$$

$$\Delta W \cong 52/3\%$$

چنان‌که مشاهده می‌شود با این روش حدود ۵۲/۳٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی شده است، اما نسبت حداکثر توان ارسال به حداقل توان ارسال برابر ۱۴/۶ است.

بهبود عملکرد با کنترل توان ارسال:

- جبران تغییرات ناشی از تلفات محیطی با تغییر نرخ، و تغییرات ناشی از تلفات فضای آزاد با تغییر توان ارسال و با فرض $V=V_0$:

$$10 \cdot \log BR(\beta) = a_1 - \frac{B}{\sin\beta} \Rightarrow BR(\beta) = 10^{\frac{a_1 - B}{\sin\beta}}$$

$$a_1 \cong 64/7987$$

$$BR(\beta) \cong 3/0.2 \times 10^6 \times 10^{\frac{-0.074}{\sin\beta}} \Rightarrow$$

$$BR: 3/58 \text{ Mbps} \sim 8/0.6 \text{ Mbps} \Rightarrow \frac{BR_{\text{Max}}}{BR_{\text{Min}}} \cong 2/25$$

در سیستم انتقال داده‌ی عملی با توان ارسال ثابت $P_{ST} = 49w$ و نرخ ارسال ثابت $BR_0 = 5/3 \text{ Mbps}$ میزان انرژی مصرفی فرستنده و حجم کل داده‌های ارسال در یک ناحیه‌ی رؤیت ماهواره برابر مقادیر زیر هستند:

$$W_0 = \frac{P_{ST} \times T}{\eta_T} \cong 117/6 \text{ kw}$$

$$V_0 = BR_0 \times T \cong 3/18 \times 10^9 \text{ bit}$$

بهبود عملکرد با کنترل نرخ ارسال:

$$\text{SNR} = P_{ST_{dB}} + V/2 + 20 \cdot \log(\sin\beta) - \frac{0.074}{\sin\beta} - 10 \cdot \log BR(\beta)$$

$$\beta_0 = 10^\circ \rightarrow \theta_0 \cong 48/5^\circ$$

- در حالت توان ارسال یکسان با سیستم پایه ($P_{ST} \cong 49w$):

$$c_0 = 10 \cdot \log 49 + V/2 - 10 = 78/1, c_1 = 10^{\frac{c_0}{10}} = 65 \times 10^6,$$

$$c_1 = -0.074$$

$$BR(\beta) = 65 \times 10^6 \cdot \sin^2(\beta) \times 10^{\frac{-0.074}{\sin\beta}} \Rightarrow$$

$$BR: 5/3 \text{ Mbps} \sim 77 \text{ Mbps}$$

$$\frac{\text{Max } BR(\beta=90^\circ)}{\text{Min } BR(\beta=10^\circ)} \cong 14/5$$

$$\text{Min } BR(\beta=10^\circ)$$

$$V \cong 6/35 \times 10^{11} \text{ bit}, \Delta V \cong 198/7 \times 100\%$$

چنان‌که مشاهده می‌شود نسبت بیشترین نرخ ارسال به کمترین نرخ ارسال در حدود ۱۴/۵ است، و درصد افزایش حجم داده‌های ارسال در یک ناحیه‌ی رؤیت ماهواره حدود ۱۹۸۷۰٪ است. اگر حجم داده‌های ارسال با سیستم پایه برابر باشد ($V=V_0$):

$$BR(\beta) = 1/3 \times 10^6 \cdot \sin^2(\beta) \times 10^{\frac{-0.074}{\sin\beta}} \times P_{ST}$$

$$V = V_0 \Rightarrow P_{ST} \cong 12/3w \Rightarrow BR: 1/3 \text{ Mbps} \sim 19 \text{ Mbps}$$

$$\frac{\text{Max } BR(\beta=90^\circ)}{\text{Min } BR(\beta=10^\circ)} \cong 14/6,$$

$$\text{Min } BR(\beta=10^\circ)$$

$$\Delta W = \frac{P_{ST} - P_{ST_0}}{P_{ST_0}} \times 100 \cong 74/9\%$$

در این حالت، نسبت بیشترین نرخ ارسال به کمترین نرخ ارسال در حدود ۱۴/۶، و درصد کاهش در مصرف انرژی کل (یا توان ارسال) در حدود ۷۴/۹٪ است.

پس از انجام جست و جوی فراگیر و با هدف به حداقل رسانیدن انرژی مصرفی، نتایج زیر حاصل می شود:

$$BR = [4Mbps, 4Mbps, 5Mbps, 6Mbps, 7Mbps, 7Mbps, 7Mbps, 7Mbps, 7Mbps, 7Mbps, 7Mbps, 7Mbps]$$

$$W \cong 4 \text{kw} \rightarrow \Delta W = 5 \text{kw} / 6 \%$$

$$\frac{BR_{Max}}{BR_{Min}} = 1/5, P_{ST} = 4/5 \text{kw} \sim 3/2 \text{kw} \rightarrow \frac{P_{ST_{Max}}}{P_{ST_{Min}}} = 1/5$$

در مقایسه با روش کنترل نرخ ارسال، محدوده تغییرات نرخ ارسال کم تر و قابل کنترل است، و در مقایسه با روش کنترل توان ارسال، محدوده تغییرات نرخ ارسال و مصرف انرژی کل تقریباً نصف شده است.

- تغییر پله‌ی نرخ و توان ارسال و با فرض $V = V_0$:

$$x = 10, \Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 = \dots = \Delta\theta_{10}$$

$$BR^{(i)} \in \{3Mbps, 4Mbps, 5Mbps, 6Mbps, 7Mbps, 8Mbps, 9Mbps\}$$

$$P_{ST}^{(i)} \in \{10 \text{kw}, 12/5 \text{kw}, 15 \text{kw}, 17/5 \text{kw}, 20 \text{kw}, 22/5 \text{kw}, 25 \text{kw}, 27/5 \text{kw}, 30 \text{kw}\}$$

پس از انجام جست و جوی فراگیر و با هدف به حداقل رسانیدن انرژی مصرفی، نتایج زیر حاصل می شود:

$$BR = [3Mbps, 3Mbps, 3Mbps, 4Mbps, 4Mbps, 4Mbps, 4Mbps, 4Mbps, 4Mbps, 4Mbps, 4Mbps, 4Mbps]$$

$$P_{ST} = [30 \text{kw}, 25 \text{kw}, 17/5 \text{kw}, 12/5 \text{kw}, 12/5 \text{kw}, 12/5 \text{kw}, 12/5 \text{kw}, 12/5 \text{kw}, 12/5 \text{kw}, 12/5 \text{kw}, 12/5 \text{kw}, 12/5 \text{kw}]$$

$$W = 54 \text{kw} \rightarrow \Delta W \cong 54 \text{kw} / 1\%, \frac{BR_{Max}}{BR_{Min}} = 3, \frac{P_{ST_{Max}}}{P_{ST_{Min}}} = 2/4$$

اگرچه بازده این روش در مقایسه با روش قبل مقداری کاهش یافته است، اما به دلیل تغییر گسسته و امکان کنترل مقادیر نرخ و توان ارسال، از ویژگی خاصی برخوردار است.

به منظور ساده کردن مقایسه بین روش های مختلف، خلاصه‌ی نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی در جدول ۱ آورده شده است.

نتیجه گیری

تغییر فاصله‌ی ماهواره‌ی LEO از ایستگاه زمینی دریافت در مدت

$$P_{ST}(\beta) \cong \frac{2/3}{\sin^2(\beta)} \Rightarrow P_{ST} = 2/3 \text{kw} \sim 1/6 \text{kw} \Rightarrow \frac{P_{ST_{Max}}}{P_{ST_{Min}}} \cong 33/2$$

$$W = 4 \times \int_{\theta_0}^{180-\theta_0} P_{ST}(\beta) \frac{600}{180-2\theta_0} d\theta \cong 65 \text{kw} \Rightarrow$$

$$\Delta W \cong 44/1 \%$$

تغییرات نرخ ارسال بسیار محدود شده است، اما محدوده تغییرات توان ارسال هنوز بسیار زیاد است. اگر تابع تغییرات نرخ ارسال به صورت زیر در نظر گرفته شود، محدوده‌ی تغییرات توان ارسال نیز به مقدار زیادی کاهش خواهد یافت:

$$10 \log BR(\beta) = a_1 + \frac{B}{\sin \beta} \Rightarrow BR(\beta) = 10^{\frac{a_1+B}{\sin \beta}}$$

$$P_{ST}(\beta) = \frac{1}{\sin^2(\beta)} \times 10^{\frac{2B}{10 \sin \beta}} \times 10^{\frac{(SNR-A+a_1)}{10}}$$

$$a_1 \cong 69/4245$$

$$BR(\beta) \cong 1/76 \times 10^6 \times 10^{\frac{-0.74}{\sin \beta}} \Rightarrow$$

$$BR: 3/28 \text{Mbps} \sim 7/39 \text{Mbps} \Rightarrow \frac{BR_{Max}}{BR_{Min}} \cong 2/25$$

$$P_{ST}(\beta) = \frac{6/6}{\sin^2(\beta)} \times 10^{\frac{-0.148}{\sin \beta}} \Rightarrow$$

$$P_{ST} = 4/7 \text{kw} \sim 30/8 \text{kw} \Rightarrow \frac{P_{ST_{Max}}}{P_{ST_{Min}}} \cong 6/55$$

$$W = 4 \times \int_{\theta_0}^{180-\theta_0} P_{ST}(\beta) \frac{600}{180-2\theta_0} d\theta \cong 47/5 \text{kw} \Rightarrow$$

$$\Delta W \cong 59/6 \%$$

در مقایسه با روش کنترل نرخ ارسال، محدوده‌ی تغییرات نرخ ارسال کاهش چشمگیری یافته است، اما در مقایسه با روش کنترل توان ارسال، محدوده‌ی تغییرات نرخ ارسال تقریباً نصف شده است (البته مصرف انرژی کل نیز مقداری کاهش یافته است).

- تغییر پله‌ی نرخ ارسال و تغییر پیوسته‌ی توان ارسال در هر پله با تغییر فاصله و با فرض $V = V_0$:

$$x = 10$$

$$BR^{(i)} \in \{4Mbps, 5Mbps, 6Mbps, 7Mbps\}$$

جدول ۱. مقایسه‌ی عملکرد روش‌های مختلف کنترل نرخ یا توان ارسال.

نوع سیستم انتقال داده	نرخ ارسال	توان ارسال	حجم داده‌های ارسال	کل انرژی مصرفی
پایه	$BR_s = 5/3 \text{ Mbps}$	$P_{ST} = 4 \text{ W}$	$V_s = 3/18 \times 10^6 \text{ bit}$	$w_s = 117/9 \text{ Kw}$
کنترل نرخ ارسال با تغییر فاصله	$BR(\beta) = 5 \sin^2(\beta) \times 10^6 / \sin^4(\beta) \text{ Mbps}$ $BR: 5/3 \text{ Mbps} \sim 7 \text{ Mbps}, \frac{BR_{Max}}{BR_{Min}} = 14/5$	$P_{ST} = P_{ST_s}$	$V = 5/3 \times 10^6 \times 10^6 \text{ bit}$ $\Delta V = 19.8 \times 10^6 \%$	$w = w_s$
کنترل توان ارسال با تغییر فاصله	$BR(\beta) = 1/3 \sin^2(\beta) \times 10^6 / \sin^4(\beta) \text{ Mbps}$ $BR: 1/3 \text{ Mbps} \sim 19 \text{ Mbps}, \frac{BR_{Max}}{BR_{Min}} = 19/3$	$P_{ST} = 17/3 \text{ W}$	$V = V_s$	$w = 30/18 \text{ Kw}$ $\Delta w = 72/9 \%$
کنترل توان ارسال با تغییر فاصله	$BR = 1/18 \text{ Mbps}$	$P_{ST}(\beta) = \frac{N/P_s}{\sin^2(\beta)} \times 10^6 / \sin^4(\beta) \text{ W}$ $P_{ST_{Max}} = 14/9$ $P_{ST_{Min}} = 1/18$	$V = 5/9 \times 10^6 \text{ bit}$ $\Delta V = 10.8/9 \%$	$w = w_s$
کنترل توان ارسال با تغییر فاصله	$BR(\beta) = 2/3 \times 10^6 / \sin^4(\beta) \text{ Mbps}$ $BR: 2/3 \text{ Mbps} \sim 9 \text{ Mbps}, \frac{BR_{Max}}{BR_{Min}} = 9/2$	$P_{ST}(\beta) = \frac{P}{\sin^2(\beta)} \times 10^6 / \sin^4(\beta) \text{ W}$ $P_{ST_{Max}} = 33/2$ $P_{ST_{Min}} = 2/3$	$V = V_s$	$w = 9/9 \text{ Kw}$ $\Delta w = 24/12 \%$
کنترل توان ارسال با تغییر فاصله	$BR(\beta) = 4/3 \times 10^6 / \sin^4(\beta) \text{ Mbps}$ $BR: 4/3 \text{ Mbps} \sim 12 \text{ Mbps}, \frac{BR_{Max}}{BR_{Min}} = 9/2$	$P_{ST}(\beta) = \frac{9/3}{\sin^2(\beta)} \times 10^6 / \sin^4(\beta) \text{ W}$ $P_{ST_{Max}} = 9/2$ $P_{ST_{Min}} = 4/3$	$V = V_s$	$w = 3/3 \text{ Kw}$ $\Delta w = 9/9 \%$
کنترل توان ارسال با تغییر فاصله	$BR = 12/3 \times 10^6 / \sin^4(\beta) \text{ Mbps}$ $BR_{Max} = 12/3$ $BR_{Min} = 12/3$	$P_{ST}^{(1)} = \frac{BR^{(1)}}{V \times 10^6} \times 10^6 / \sin^4(\beta) \text{ W}$ $P_{ST_{Max}} = 12/3$ $P_{ST_{Min}} = 12/3$	$V = V_s$	$w = 2/3 \text{ Kw}$ $\Delta w = 9/9 \%$

ارسال و توان ارسال، عملکرد خوبی را ارائه می‌دهند، اما بازه‌ی زیاد تغییرات توان یا نرخ ارسال پیاده‌سازی عملی آنها را دشوار می‌سازد. روش کنترل توأم نرخ و توان ارسال، امکان کاهش زیاد و قابل کنترل بازه‌های تغییر نرخ و توان را فراهم می‌آورد. ضمناً چون پیاده‌سازی سیستم مخابراتی با تغییر پیوسته‌ی نرخ یا توان ارسال در عمل ساده نیست، روش تغییر پله‌ی نرخ و توان ارسال در ناحیه‌ی رؤیت ماهواره پیشنهاد و بررسی شد.

برقراری ارتباط، باعث هدر رفتن مقداری از توانایی سیستم مخابراتی انتقال داده می‌شود. در این نوشتار، استفاده از روش‌های کنترل نرخ یا توان ارسال براساس تغییر فاصله به‌منظور بهبود کارایی سیستم انتقال داده در ماهواره‌های LEO مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های انجام شده برای روش‌های کنترل نرخ و توان ارسال، نشان‌دهنده‌ی بهبود زیاد در کارایی سیستم انتقال داده، در مقایسه با سیستم پایه‌اند (جدول ۱). اگرچه روش‌های کنترل نرخ

پانویس

1. Low Earth Orbit
2. Signal to Noise Ratio
3. Joint Source Channel Coding
4. Elevation Angle
5. Best Case
6. Worst Case
7. Additive White Goussian Noise

منابع

1. Lambert-Nebout, C., Lesthievant, G., Senant, E. and Pelleau, F. "Joint source channel coding for on-board space systems", *IEEE International Workshop on DSP*, 1-3, (October 2001).
2. Gaboy, A., Duhanel, P. and Rioul, O. "Real BCH codes for satellite images codin", *IEEE GLOBECOM Conference*, (1) (November 2001)
3. GU, J., Jiang, Y. and Baras, J.S. "A video transmission system based on human visual model for satellite channel", *ISR Technical Research Report*, ISR TR (1999-2003).
4. da Cunha, A.L.A., Finamore, W.A. and da Silva, E.A.B.

- "Robust remote sensing still image coding with low memory requirements", 0-7803-7536-X/02,IEEE (2002).
5. Chu, V.Y.Y., Sweeney, P. and Sweeting, M.N. "Characterising error sequences of the low earth orbit satellite channel and optimisation with hybrid-ARQ techniques" *IEEE Global Telecommunications Conference*, (November 1998).
6. Stojanovic, M. and Chan, V. "Adaptive power and rate control for satellite communications in ka-band", *IEEE International Conference on Communications (ICC'02)*, New York, (May 2002).
7. Nivens, D. "Uplink power control for a ka-band processing payload telecommunications system", International Astronautical Federation, (2001).
8. Mehta, M., Nunn, D. and Braithwaite, S. "Predictive action power control scheme for a land mobile satellite system", *Research Journal*, University of Southampton, (1995-1996).
9. Maral, G. and Bousquet, M. "Satellite communications systems", John Wiley, 4th Edition, (2002).
10. Larson, W.J. and Wertz, J.R. "Space mission analysis and design", Microcosm Inc., (1992).