

ردیابی ماهواره های غیرسنکرون به روش مونوپالس

یاسر مختاری^۱

مهرزاد نصیریان^۲

چکیده

ماهواره‌های غیرسنکرون با سرعتی بیش از سرعت وضعی زمین می‌چرخند، لذا روش‌های ردیابی دقیق ماهواره‌ها ضروری است. اما ممکن است به دلیل اثرات برخی عوامل محیطی مانند تغییر شکل ساختار آنتن و فشار باد، ماهواره دقیقاً در داخل بیم تشعشعی آنتن قرار نگرفته باشد، در نتیجه موقعیت بیم آنتن با موقعیت اندازه‌گیری شده توسط انکودر اندکی تفاوت دارد. یکی از دقیق‌ترین فن‌های ردیابی خودکار، مونوپالس است. در این مقاله، روش مونوپالس برای از بین بردن اختلاف موقعیت به وجود آمده، تحلیل و شبیه‌سازی شده است و نتایج حاصل، دقت بسیار بالای این تکنیک را نشان می‌دهد. کاهش خطای بیم و افزایش توان دریافتی هورن‌ها برحسب نسبت سیگنال به نویز بررسی شده است. همچنین پارامترهای بایاس، واریانس و ریشه میان‌بهره مربعات خطا^۳ (RMSE) در فن ردیابی مونوپالس برحسب نسبت سیگنال به نویز ارائه شده است.

کلید واژه

آنتن ایستگاه زمینی، ردیابی خودکار، ماهواره، مونوپالس

۱. دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر yasser.mokhtari@gmail.com

۲. دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر

3. Root Mean Square Error

تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۱۰

مقدمه

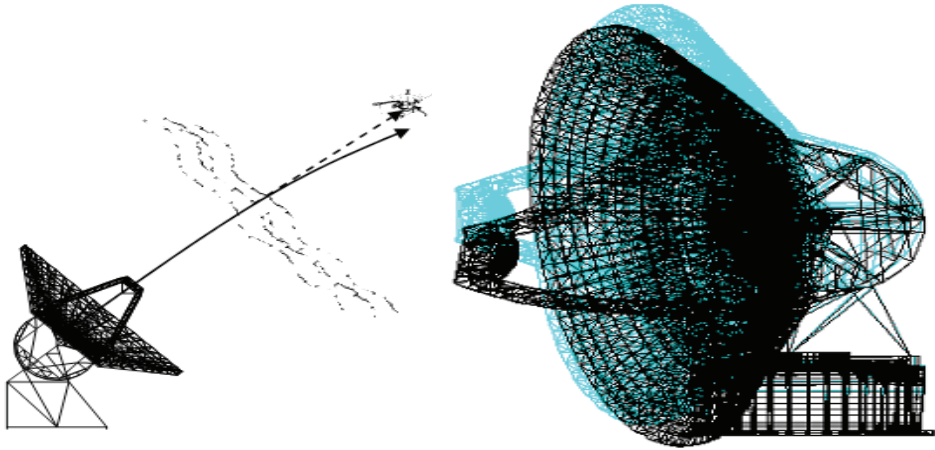
امروزه در سامانه های ماهواره ای، کنترل اتوماتیک و دقیق موقعیت آنتن ردیاب ماهواره اهمیت زیادی دارد، زیرا در صورت عدم دقت کافی در تعیین موقعیت آنتن، حجم زیادی از اطلاعات ارسال و یا دریافت شده از ماهواره از بین میرود.

برنامه های ردیابی ماهواره به اطلاعاتی در مورد شکل و جهت مدارهای ماهواره نیاز دارند. این داده ها، پارامترهای کپلر^۱ نامیده می شوند. نرم افزارهای مختلفی در دنیا از جمله Nova، Navstar، J-Track، Orbitron و STK با استفاده از اطلاعات مداری ماهواره و الگوریتم های پیشگویی، نقاط تنظیم^۲ مناسب آنتن ایستگاه زمینی جهت ردیابی ماهواره های غیرسنکرون را تولید می کنند و این مسیر تولید شده به عنوان داده های مرجع آنتن به سامانه سرو داده می شوند [۱]. این روش، ردیابی برنامه ریزی^۳ نامیده می شود. اما ممکن است به دلیل اثرات برخی عوامل محیطی مانند تغییر شکل ساختار آنتن و فشار باد، ماهواره دقیقاً در داخل بیم تشعشعی آنتن قرار نگرفته باشد، در نتیجه آنتن دقیقاً به ماهواره اشاره نمی کند (شکل ۱) [۲]. بنابراین از فنون ردیابی خودکار برای هم راستا کردن آنتن ایستگاه زمینی با ماهواره استفاده می شود [۳]. در این فنون، ردیابی از طریق سیگنال نشانه (سیگنال مخصوص ردیابی) صورت می گیرد و مقادیر مرجع آنتن ایستگاه زمینی جهت دریافت ماکزیمم دامنه سیگنال دریافتی از ماهواره، توسط مد اتوتراک (روش ردیابی مونوپالس) به روزرسانی می شود فنون ردیابی خودکار از نظر دقت و قابلیت اطمینان در ردیابی، هزینه و پیچیدگی ساخت با یکدیگر تفاوت دارند. یکی از دقیق ترین این تکنیک ها، مونوپالس چهار هورن است.

1. Keplerian Parameters

2. Set-Point

3. Program Track



(ب)

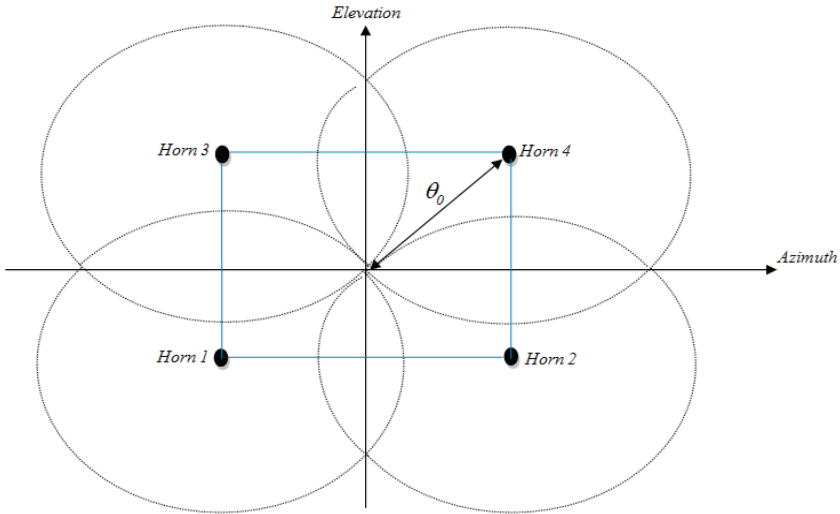
(الف)

شکل ۱- الف) تغییر شکل آنتن تحت تاثیر نیروی جاذبه و ب) انکسار اتمسفری [۲]

این مقاله از بخش‌های زیر تشکیل شده است، در بخش دوم، گیرنده مونوپالس ارائه شده و نحوه تخمین آفست‌های سمت و فراز ماهواره با اندازه‌گیری توان دریافتی در هر یک از هورن‌ها بررسی شده است. در بخش سوم، پارامترهای تخمین شامل بایاس، واریانس و ریشه میان‌بهره مربعات خطا محاسبه شده است. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی الگوریتم ردیابی مونوپالس و در بخش آخر، نتایج ارائه شده است.

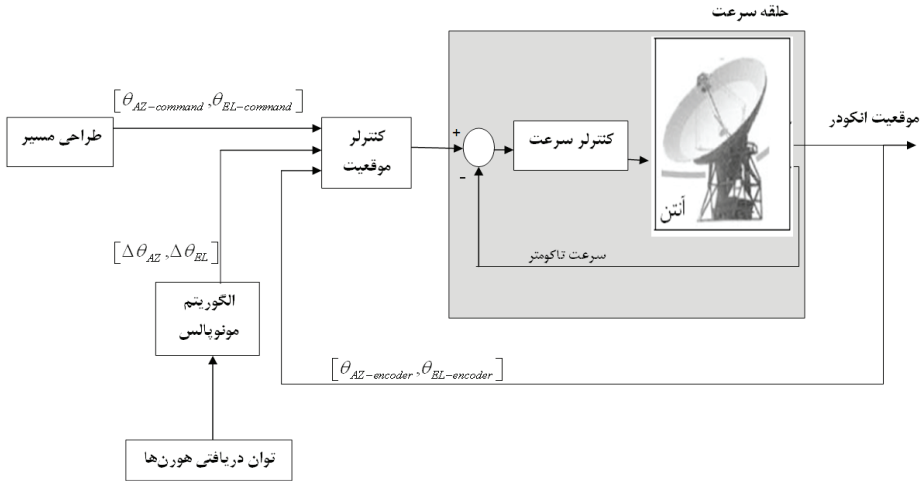
گیرنده مونوپالس

کنترل‌کننده‌های مونوپالس براساس پردازش سیگنال رادیویی بیکن ارسالی از ماهواره بطور مستقیم کار می‌کنند. در این روش، اطلاعات موقعیت هدف از یک پالس به‌دست می‌آید. لذا دریافت سیگنال توسط چند جفت دوتایی کانال صورت می‌گیرد (هر جفت دوتایی برای هر محور مختصات). فن ردیابی مونوپالس، تنوعی از فنون فید را دارد [۵]. یکی از دقیق‌ترین این فن‌ها، مونوپالس چهار هورن است (شکل ۲).



شکل ۲- مکان هندسی مراکز چهار هورن نسبت به محور آنتن در فن مونوپالس

در این مقاله، برای محاسبه آفست‌های سمت و فراز ماهواره از فن ردیابی مونوپالس مقایسه دامنه چهار هورن با جداساز زاویه مجموع و تفاضلی استفاده شده است. اصل فن مونوپالس ساده است. هر یک از فید هورن‌های ردیاب مونوپالس سیگنال ارسالی از ماهواره را از یک موقعیت کمی متفاوت و با اختلاف توان اندکی نسبت به هم دریافت می‌کنند. توان دریافتی هورن‌های متضاد به هم اضافه می‌شوند تا یک بیم جمع تشکیل دهند و از هم تفریق میشوند تا یک بیم تفاضلی تشکیل دهند. بیم تفاضلی، خطای نشانه روی آنتن را مشخص می‌کند. اگر بیم تفاضلی صفر باشد، آنتن رو به هدف است ولی اگر بیم تفاضلی غیر صفر باشد، خطای نشانه روی تولید می‌شود. در این قسمت نحوه به‌دست آوردن موقعیت بیم با استفاده از اندازه‌گیری‌های توان به‌منظور کاهش خطای نشانه روی آنتن توضیح داده می‌شود.



شکل ۳- بلوک دیاگرام کنترلی ردیابی مونیپالس

محاسبه توان دریافنی هورن‌ها

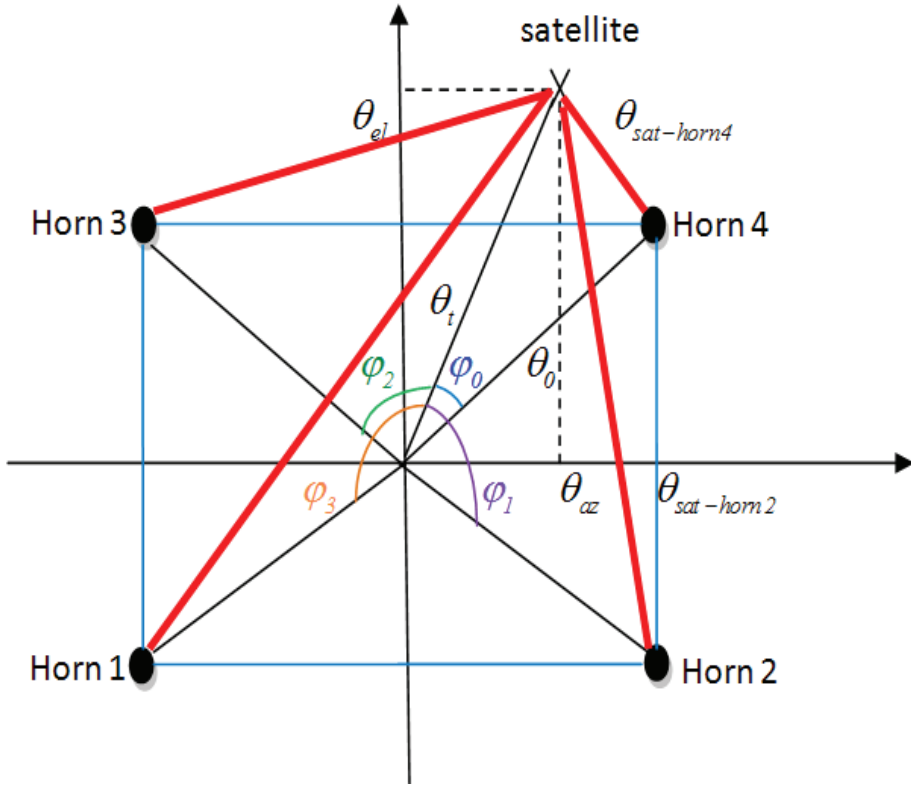
عموما تحلیل عملکرد ردیابی آنتن به راستای بیم اصلی ارتباط دارد. نمایش مناسبی از قسمت‌های سطح بالای بیم اصلی آنتن، یک تابع گوسی است که برای طراحی‌های عملی آنتن انتخاب مناسبی است و توسط رابطه زیر نشان داده می‌شود [۶]:

$$f(\theta) = P_0 \exp \left[-k \left(\frac{\theta}{\theta_{3-dB}} \right)^2 \right] + v_i \quad (\text{voltage})$$

که در رابطه فوق، θ زاویه اندازه‌گیری شده از خط دید بیم اصلی، v_i سیگنال نویز سفید و θ_{3-dB} عرض بیم نصف توان آنتن است.

همچنین مقدار k با ارزیابی معادله (۱) در نقطه نصف توان $\left(\frac{\theta_{3-dB}}{2} \right)$ به دست می‌آید و مقدار آن برابر با ۱,۳۸۱۶ است.

با در نظر گرفتن شکل (۲) و قرارگیری آفست ماهواره در هر یک از چهار ناحیه، روابط مربوط به θ (زاویه بین ماهواره و هورن‌ها) به دست می‌آید. در اینجا نحوه محاسبه θ در ناحیه اول ارائه شده است (شکل ۴). محاسبه θ در سایر نواحی مشابه با ناحیه اول است.



شکل ۴- مکان هندسی آفست ماهواره، مراکز هورن‌ها و محور آنتن در فنون ردیابی مونوپالس (ناحیه اول)

$$\theta_{sat-horn1}^2 = \theta_0^2 + \theta_t^2 + 2\theta_0\theta_t \cos \left[45 - \text{Arctan} \left(\frac{\theta_{el}}{\theta_{az}} \right) \right] \quad (۲)$$

$$\theta_{sat-horn2}^2 = \theta_0^2 + \theta_t^2 - 2\theta_0\theta_t \cos \left[45 + \text{Arctan} \left(\frac{\theta_{el}}{\theta_{az}} \right) \right] \quad (۳)$$

$$\theta_{sat-horn3}^2 = \theta_0^2 + \theta_t^2 + 2\theta_0\theta_t \cos \left(45 + \text{Arctan} \left(\frac{\theta_{el}}{\theta_{az}} \right) \right) \quad (۴)$$

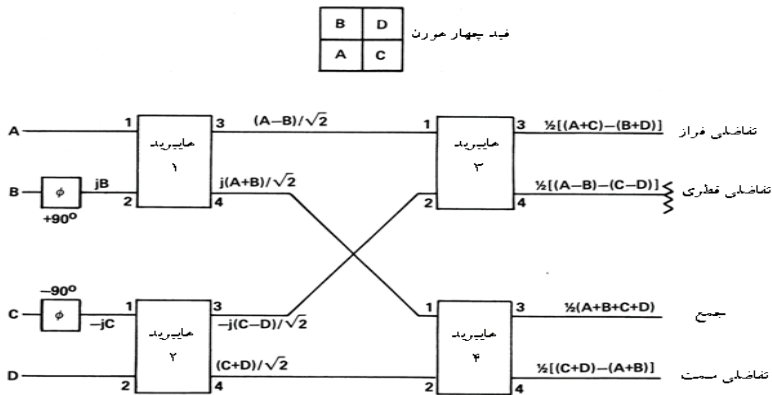
$$\theta_{sat-horn4}^2 = \theta_0^2 + \theta_t^2 - 2\theta_0\theta_t \cos \left[45 - \text{Arctan} \left(\frac{\theta_{el}}{\theta_{az}} \right) \right] \quad (۵)$$

که در رابطه های فوق، θ_0 آفست زاویه ای هورن نسبت به محور آنتن، θ_t آفست زاویه ای ماهواره نسبت به محور آنتن و $\theta_{sat-horn4}$ زاویه بین ماهواره و هورن چهارم، θ_{el} آفست زاویه فراز ماهواره نسبت به محور آنتن و θ_{az} آفست زاویه سمت ماهواره نسبت به محور آنتن است.

سپس با قرار دادن مقادیر محاسبه شده از معادله های فوق در معادله (۱)، توان دریافتی در هر یک از چهار هورن (f_1, f_2, f_3, f_4) به دست می آید.

تخمین موقعیت ماهواره با استفاده از اندازه گیری های توان دریافتی هورن ها

با ترکیب توان دریافتی هورن ها، سیگنال جمع و سیگنال های تفاضلی سمت و فراز به دست می آیند. تجهیزاتی که یک سیگنال جمع و دو سیگنال تفاضلی را تولید می کنند، مقایسه گر^۱ یا مبدل^۲ نامیده می شوند.



شکل ۵- مقایسه گر برای فید مونوپالس چهارهورن با استفاده از هایبرید تربیع^۳ [۵]

با انتخاب نوع مقایسه گر مطابق با شکل (۵)، روابط مربوط به سیگنال جمع (E_{sum}) و سیگنال تفاضلی سمت ($E_{AZ-difference}$) و سیگنال تفاضلی فراز ($E_{EL-difference}$) به صورت زیر به دست می آیند.

1. Comparator
2. Convertor
3. Quadrature Hybrid

$$E_{sum} = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4}{2} \quad (۶)$$

$$E_{AZ-difference} = \frac{(f_2 + f_4) - (f_1 + f_3)}{2} \quad (۷)$$

$$E_{EL-difference} = \frac{(f_3 + f_4) - (f_1 + f_2)}{2} \quad (۸)$$

در فن ردیابی مونوپالس، سیگنال خطای سمت ($E_{AZ-error}$) و سیگنال خطای فراز ($E_{EL-error}$) با استفاده از سه سیگنال تولید شده در معادله‌های فوق به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$E_{AZ-error} = \frac{E_{AZ-difference}}{E_{sum}} \quad (۹)$$

$$E_{EL-error} = \frac{E_{EL-difference}}{E_{sum}} \quad (۱۰)$$

همچنین داریم [۷]:

$$E_{AZ-error} = k_m \frac{\hat{\theta}_{az}}{\theta_{3-dB}} \quad , \quad E_{EL-error} = k_m \frac{\hat{\theta}_{el}}{\theta_{3-dB}} \quad (۱۱)$$

که در رابطه‌های فوق، $\hat{\theta}_{az}$ و $\hat{\theta}_{el}$ به ترتیب مقادیر تخمینی آفست زاویه‌ای سمت و فراز ماهواره نسبت به محور آنتن هستند و k_m ، شیب سیگنال‌های خطای سمت و فراز می‌باشد که به دلیل تقارن یکسان هستند و از رابطه زیر به دست می‌آید [۸]:

$$k_m = \left. \frac{\partial E_{AZ-error}}{\partial \theta} \right|_{\theta_{t-AZ}=0} = \left. \frac{\partial E_{EL-error}}{\partial \theta} \right|_{\theta_{t-EL}=0} \quad (۱۲)$$

که در رابطه فوق $\theta_{t-AZ} = 0$ ، زمانی است که زاویه سمت ماهواره در راستای زاویه سمت محور آنتن قرار دارد و $\theta_{t-EL} = 0$ ، زمانی است که زاویه فراز ماهواره در راستای زاویه فراز محور آنتن قرار دارد. با محاسبه سیگنال‌های خطای سمت و فراز و انجام محاسبات جبری، می‌توان نشان داد که مقدار شیب سیگنال‌های خطای سمت و فراز در الگوی گوسی بیم از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$k_m = 4 \ln(2) \frac{\theta_0}{\theta_{3-dB}} \quad (13)$$

با قرار دادن مقدار از معادله (۱۳) و با استفاده از معادله (۱۱)، مقادیر تخمینی آفست زاویه‌ای سمت و فراز ماهواره نسبت به محور آنتن به دست می‌آیند.

محاسبه خطا، واریانس و ریشه میانبره مربعات خطا تخمین در فن مونوپالس

در این قسمت پارامترهای مختلف تخمین شامل بایاس، واریانس و ریشه میانبره مربعات خطا (RMSE) تحلیل می‌شوند. فرض شود مقدار واقعی (حقیقی) زاویه، θ و مقدار تخمین زده شده، $\hat{\theta}$ است. در این صورت پارامترهای ذکر شده در بالا توسط معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$Bias(\theta) = E(\theta - \hat{\theta})$$

$$Var(\hat{\theta}) = E(\hat{\theta}^2) - E(\hat{\theta})^2$$

$$RMSE(\theta - \hat{\theta}) = \sqrt{\text{var}(\theta) + [bias(\theta)]^2}$$

شبیه‌سازی الگوریتم ردیابی مونوپالس

در این قسمت، عملکرد سامانه الگوریتم نشانه روی پیشنهادی را برای ماهواره IRS-P6 با آنتن 8/2 متری بررسی کردیم. به‌منظور شبیه‌سازی الگوریتم، مسیرهای تخمینی ماهواره که از داده‌های TLE توسط نرم افزارهایی نظیر STK و یا NOVA به دست می‌آیند، در اختیار ما قرار گرفت و با اضافه کردن آفست به مسیر ماهواره، نحوه از بین بردن آفست ماهواره توسط الگوریتم ردیابی مونوپالس را مشاهده کردیم.

باید توجه کرد که گرچه یک ماهواره می‌تواند نسبت به مختصات ثابت سریعتر حرکت کند، ولی در یک دستگاه مختصات انتخابی نوعاً به صورت کند حرکت می‌کند (این حرکت نسبی به واسطه اغتشاش‌هایی که به‌کندی تغییر می‌کنند، به وجود می‌آید). به‌عنوان مثال گرادیان‌های دمایی که موجب دقیق نشدن نشانه‌روی آنتن می‌شود، پریود چندین ساعته دارند، در حالی که مدت زمان عملکرد مونوپالس بسیار کم است. بنابراین، می‌توان فرض کرد که موقعیت هدف در مدت زمان عملکرد مونوپالس ثابت است.

همچنین توان دریافتی از آنتن به صورت ولتاژی در اختیار الگوریتم قرار گرفته و الگوریتم برای تصحیح خطا و بیشینه‌سازی حداقل توان دریافتی، اجرا گردید. در جدول (۱)، پارامترهای انتخابی به کار رفته در شبیه‌سازی الگوریتم ردیابی مونوپالس و مقادیر آنها نشان داده شده است.

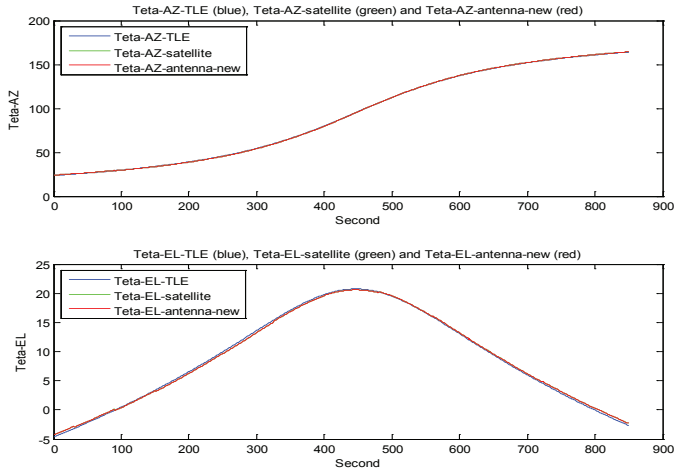
جدول ۱- پارامترهای انتخابی به کار رفته در شبیه‌سازی الگوریتم ردیابی مونوپالس

واحد	مقدار	کمیت
درجه بر ثانیه	۱۵	حداکثر سرعت چرخش سمت
درجه بر ثانیه	۱۵	حداکثر سرعت چرخش فراز
درجه بر ثانیه	۰/۰۶	حداکثر سرعت زاویه‌ای ماهواره
دسی‌بل	۴۰ و ۶۰	سیگنال به نویز (SNR)
درجه	۰/۳	آفست زاویه‌ای هورن‌های فید نسبت به محور آنتن (θ_0)
متر	۸/۲	قطر دیش آنتن (D)
گیگا هرتز	باند S (۲/۲ تا ۲/۳)	محدوده فرکانس ردیابی
گیگا هرتز	باند X (۸/۰۲۵ تا ۸/۴)	
درجه	۱/۵	عرض بیم نصف توان (θ_{3-dB})
وات	۱	ماکزیمم توان حامل (P_0)

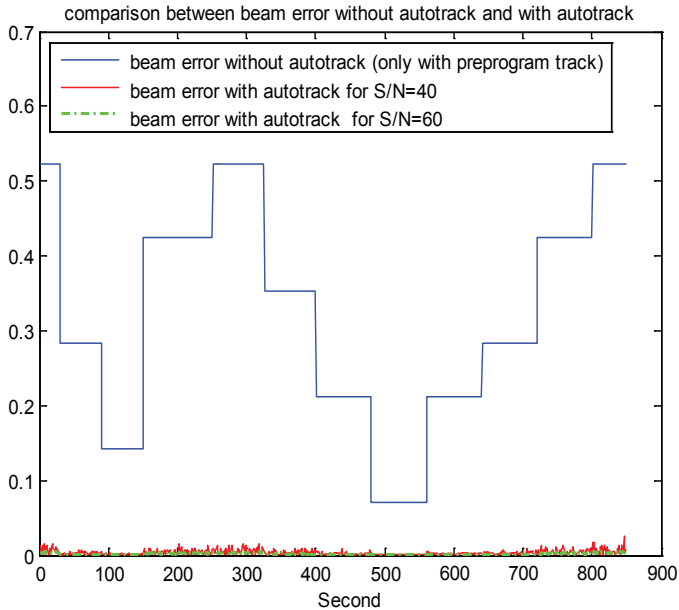
شکل (۶) همگرایی مسیر سمت و فراز محاسباتی ماهواره به مسیر واقعی آن را با الگوریتم پیشنهادی، به‌ازای سیگنال به نویز برابر با ۴۰ دسی‌بل نشان می‌دهد.

الزامات ردیابی آنتن بستگی به کاربرد سیستم دارد. کاربردهای مخابراتی نیاز دارند راستای سیگنال را با دقت مشخصی حفظ کنند. وقتی ماهواره بر روی محور پترن تشعشعی آنتن قرار دارد، بهره آنتن حداکثر خواهد بود، ولی اگر زاویه آفست بین ماهواره و محور پترن آنتن ایجاد شود، بهره آنتن افت خواهد کرد. عموماً دقت ردیابی لازم برای کاربردهای مخابراتی ۰/۱ پهنای بیم است که این هم اتلاف نشانه‌روی را به حدود ۰/۱ دسی‌بل محدود می‌کند. همان‌طور که از شکل (۷) مشخص است الگوریتم ردیابی پیشنهادی موجب کاهش خطای زاویه بیم بسیار کمتر از ۰/۱ عرض بیم نصف توان (۰/۱۵) درجه) شده است.

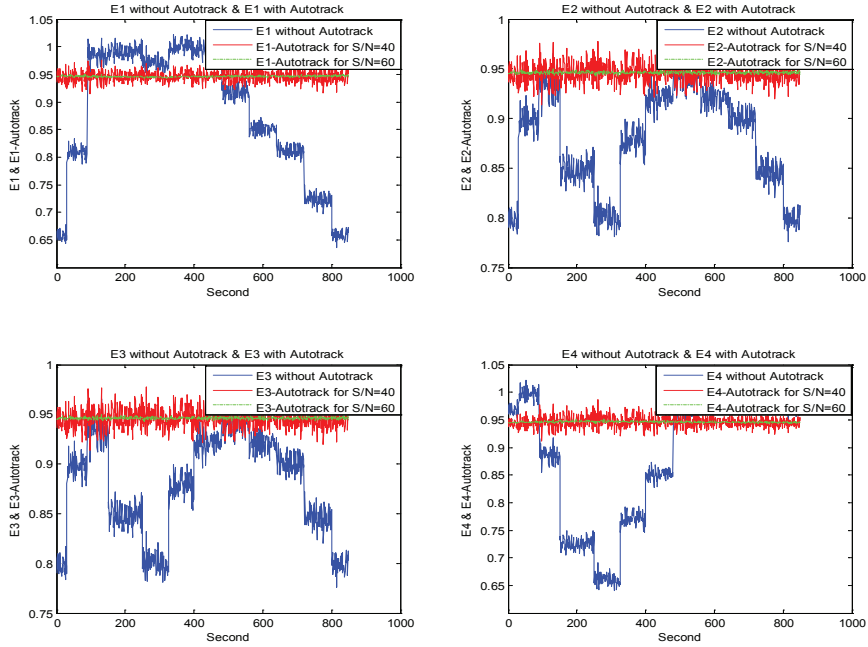
همان طور که انتظار می رود، توان دریافتی در هر یک از هورن ها با اعمال الگوریتم پیشنهادی افزایش یافته است (شکل ۸). همچنین پارامترهای مختلف تخمین شامل بایاس، واریانس و ریشه میانبره مربعات خطا به ازای سیگنال به نویزهای مختلف مقایسه شده اند (شکل ۹).



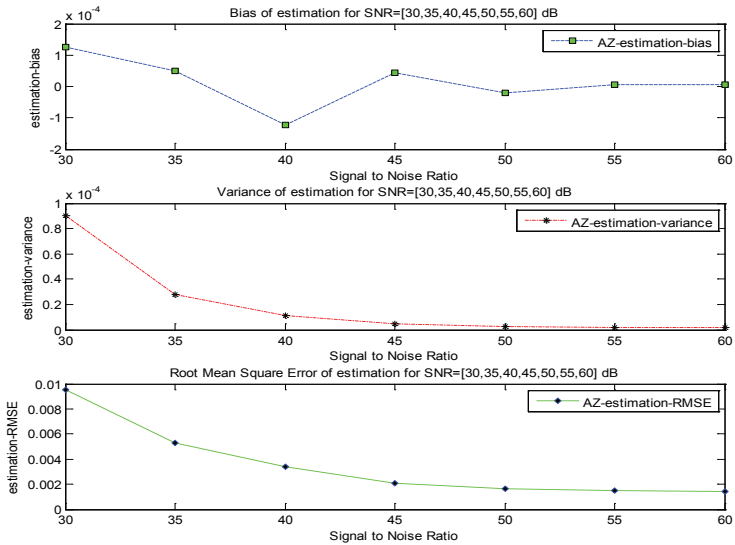
شکل ۶- مشاهده همگرایی مسیر سمت و فراز محاسباتی ماهواره به مسیر واقعی آن به ازای SNR = 40 dB با الگوریتم پیشنهادی



شکل ۷- کاهش خطای زاویه بیم به ازای SNR = ۴۰.۶۰ با الگوریتم پیشنهادی



شکل ۸- افزایش توان دریافتی هورن‌ها به‌ازای $SNR = 40, 60$ dB با الگوریتم پیشنهادی



شکل ۹- محاسبه خطا، واریانس و ریشه میان‌بهره مربعات خطا (RMSE) تخمین به‌ازای

$$SNR = [30, 35, 40, 45, 50, 55, 60] \text{ dB}$$

نتیجه گیری

در این مقاله، روش پیشنهادی ردیابی مونوپالس مقایسه- دامنه چهار هورن برای یک دوره حرکت ماهواره IRS-P6 انجام گرفت. تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام شده بر اساس تقریب گوسی بیم الگوی آنتن سهموی بود. نتایج شبیه سازی‌ها نشان دادند که تخمین آفست‌های سمت و فراز ماهواره، موقعیت دقیق آن را با یک دقت خیلی بالا تعیین می‌کند. معیار قابل قبول برای ردیابی، کاهش خطای زاویه بیم به میزان ۰/۱ عرض بیم نصف توان (۰/۱۵ درجه) بود که با الگوریتم پیشنهادی، دقت بسیار بهتری نسبت به معیار مذکور به دست آمده است. همچنین شبیه سازی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش نسبت سیگنال به نویز می‌توان به تخمین‌های بهتری دست یافت.

مراجع

1. Dusan Vuckovic 1, Petar Rajkovic, Dragan Jankovic. Guidelines for Satellite Tracking (NAVSTAR Software), IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, 2005.
2. Gawronski, W. "Control and Pointing Challenges of Antennas and Telescopes", American Control Conference, 2005.
3. G. J. Hawkins, D. J. Edwards and J. P. McGeehan, "Tracking Systems for Satellite Communications" IEE, Proceeding, Vol. 135, pp. 393-407, Oct, 1988.
4. Gawronski, W. "Modeling and Control of Antennas and Telescopes", Springer Science & Business Media, 2008.
5. Samuel. M. Sherman, "Monopulse Principles and Technique", Artech House, 1984.
6. R.B. Dybdal, "Communication Satellite Antennas : System Architecture, Technology and Evaluation,", New York, McGraw-Hill, 2009.
7. J. Nateghi, L. Mohammadi and G.R. solat, "Analysis of the Four-horn Mono

pulse for LEO Satellite Tracking Using the Exact Model”, IEEE ICACT, 2009.

8.Peyton Z. Peebles, Jr., “Radar Principles”, John Wiley & Sons, inc., 1990.