

# حذف جمینگ به روش زیرفضا در گیرنده‌های GPS<sup>۱</sup>

مصطفی یارقلی<sup>۱</sup>، مجتبی لطفی‌زاد<sup>۲\*</sup>

۱-دانش‌آموخته کارشناسی ارشد الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲-استادیار الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

lotfizad@yahoo.com

**چکیده-** روشهای مختلفی برای حذف جمینگ وجود دارد که با توجه به شرایط عملکرد و نوع جمر، یکی از آنها انتخاب می‌شود. یکی از انواع جمرها، جمرهای FM<sup>۲</sup> باند باریک هستند که برای حذف این نوع جمرها از روش زیرفضا استفاده می‌کنیم. در روش زیرفضا مقدار IF<sup>۳</sup> سیگنال تخمین زده می‌شود و بردار زیرفضای متعامد بر جمر ایجاد می‌شود. اگر تعداد آنتن‌های آرایه‌ای افزایش یابد، عملکرد سیستم بهبود می‌یابد. در محاسبه زیرفضای آرایه دو آنتنی، اصلاحاتی انجام و این روش برای آرایه سه آنتنی تعمیم داده شد. روش زیرفضا توسط نرم افزار متلب<sup>۴</sup> شبیه‌سازی و SINR<sup>۵</sup> خروجی گیرنده در هر حالت محاسبه شده است. اگر تخمین IF دچار خطا شود، SINR سیستم کاهش می‌یابد؛ در این حالت استفاده از آنتن‌های آرایه‌ای عملکرد سیستم را نسبت به تک آنتن بهبود می‌بخشد.

**کلید واژگان:** GPS، حذف جمینگ، سیگنال به نویز و تداخل<sup>۶</sup>، زیرفضا، IF.

## ۱- مقدمه

عوامل مختلفی باعث کاهش دقت سیستم موقعیت یابی می‌شوند. بعضی از این عوامل ناشی از خطای ارسال اطلاعات ماهواره ها و خطای عمدی و بعضی ناشی از خطای انتشار است که توسط تروپوسفر و یونسفر به سیستم اضافه می‌شوند. نوع دیگر خطاها، خطای ناشی از نویز محیط و نویز گیرنده و اختلال عمدی (جمر) می‌باشد. برای اینکه کاربران غیرنظامی نتوانند براحتی به اطلاعات GPS دست یابند، تکنیک‌هایی وجود دارد که باعث کاهش دقت GPS می‌شوند. یکی تکنیک SA است که هدف از آن، دستکاری اطلاعات برای کاهش دقت سیستم برای کاربران غیر نظامی می‌باشد و دیگری روش

آنتی اسپوفینگ<sup>۷</sup> که هدف از آن، محدودسازی دسترسی کاربران به کد P می‌باشد. در این روش کد P همراه با یک کد W از طریق عملگر OR انحصاری، کد جدیدی را تولید می‌کند که به کد P(Y) معروف است. از آنجا که کد W برای کاربران غیرنظامی شناخته شده نیست، بنابراین گیرندگان غیرمجاز، قادر به دسترسی به اطلاعات این کد نیستند. کد P(Y) از نظر دقت، بسیار دقیق‌تر و مهمتر از کد C/A است. کاربران مجاز به کمک اطلاعات این کد، به دقتی در حد متر و بهتر از آن دسترسی پیدا می‌کنند.

1. Global Positioning System
2. Frequency Modulation
3. Instance Frequency
4. Matlab
5. Signal to Interface Plus Noise Ratio
6. SINR
7. Anti-Spoofing

باشند، به کار می‌روند. تبدیل ویولت و پردازش زیرفضا نسبت به روشهایی مانند STFT، رزولوشن زمان-فرکانس بهتری دارند [۱، ۳].

تا زمانی که سطح توان جمر تا ۵dB از سطح توان سیگنال بزرگتر نباشد، می‌توان از روش طیف گسترده<sup>۲</sup> برای مقابله با جمینگ استفاده کرد؛ اما وقتی توان جمر از توان سیگنال بسیار بزرگ شود که در سیستم‌های نظامی بخصوص GPS چنین است، از روشهای ذکر شده در بالا برای حذف جمینگ استفاده می‌کنیم [۱، ۴].

## ۲- پردازش زیرفضا

فرکانس لحظه‌ای<sup>۳</sup> جمر FM توسط توزیع t-f یا روش دیگری تخمین زده می‌شود. فرکانس لحظه‌ای برای مشخص کردن مشخصه لحظه‌ای تداخلهای FM، و این مشخصه برای حذف تداخل گیرنده GPS به کار می‌رود. ابتدا ماتریس جمر محاسبه شده و توسط این ماتریس، توان سیگنال جمر قبل از همبسته شدن با کدهای C/A<sup>۴</sup> رسیده به گیرنده، حذف می‌شود. در این صورت SINR بهبود یافته و نرخ خطای بیت کاهش می‌یابد [۴-۶].

جمرهای FM عمده‌تاً باند باریک هستند و مشخصه t-f واضحی دارند که از کدهای گسترش یافته C/A قابل تشخیص است.

### ۲-۱- حذف زیرفضا در گیرنده GPS

شکل ۱ ساختار فرستنده GPS و سیگنالهای  $L_1$  و  $L_2$  و نحوه استفاده از کدهای P و C/A را در سیگنالهای  $L_1$  و  $L_2$  نشان می‌دهد. داده‌های ناوبری با نرخ سیمبل ۵۰bps انتقال یافته و با کدهای C/A و کد P گسترش می‌یابند.

انواع جمرهای نقطه‌ای و مسلسل‌وار و جاروب شونده و قفل جاروب یا ترکیبی از این جمرها، سیستم گیرنده را تحت تأثیر قرار می‌دهند، همپا با پیچیدگی مولدهای جمر، روشهای حذف جمر نیز ارتقا می‌یابند. جمرهایی که توان آنها در حد توان سیگنال ماهواره باشند، به کمک روش طیف گسترده حذف می‌شوند اما برای جمرهای با توان بالا، از روشهای خاصی باید استفاده شود. انتخاب روش حذف جمینگ به کاربرد خاص و موقعیت گیرنده و پیچیدگی سیستم و نوع جمر بستگی دارد. به عنوان مثال برای جمرهای FM باند باریک با توان بالا، از روش زیرفضای متعامد استفاده می‌شود اما برای جمرهای باند پهن از آنتن‌های آرایه‌ای استفاده می‌شود. البته در جایکه محدودیت وزن و فضا داشته باشیم، نمی‌توانیم از آنتن‌های آرایه‌ای استفاده کنیم، زیرا آنتن‌های آرایه‌ای پیچیده و جاگیر هستند. در موشکها از روشهای مبتنی بر پردازش حوزه زمان-فرکانس برای حذف جمینگ استفاده می‌شود.

ملاحظه می‌شود که روشهای مختلفی برای حذف جمینگ وجود دارد و انتخاب روش، به پارامترهایی مانند هزینه، فضای اشغال شده، اتلاف توان و محیطی که ضد جمر در آن به کار می‌رود و نوع جمرها (باند باریک یا باند پهن) وابسته است. روشهای ضد جمینگ باند باریک به: فیلترگذاری و فقی، روشهای t-f (زمان-فرکانس)، آنتنهای و فقی و پردازش زیرفضا تقسیم می‌شوند [۱، ۲].

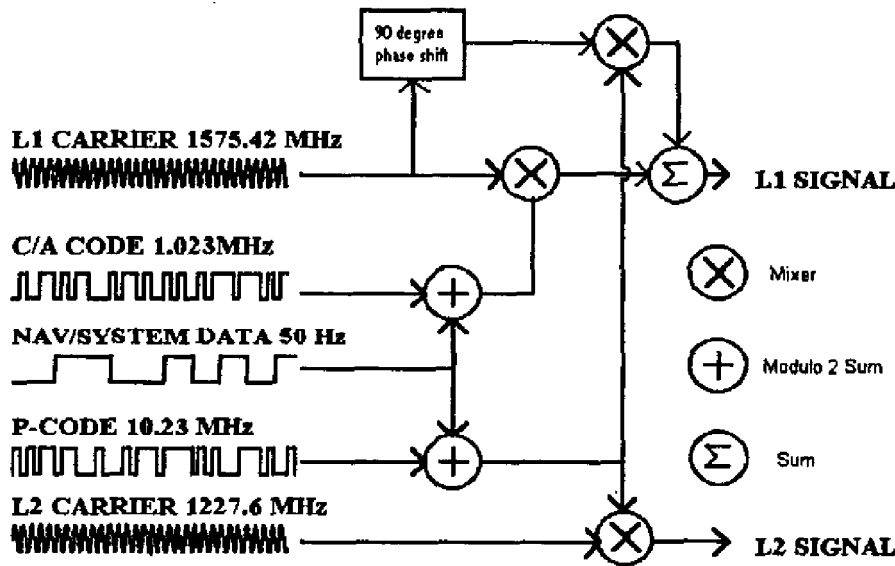
جمرهای باند پهن، با استفاده از آنتن‌های آرایه‌ای با پردازش فضایی حذف می‌شوند. روشهای حذف جمینگ مبتنی بر زمان-فرکانس مانند پردازش تبدیل فوریه کوتاه، مدت<sup>۱</sup> STFT، بانک فیلترها، تبدیلات ویولت و پردازش زیرفضا برای مصارف با هزینه کم و توان کم و الگوریتم‌های با تعداد کم ضرایب، استفاده می‌شوند. آنتن‌های آرایه‌ای بسیار پیچیده و جاگیر هستند و فقط برای سیستم‌هایی که در هواپیما، کشتی یا در زمین مستقر

2. Spread Spectrum

3. IF

4. Coarse Acquisition

1. Short Time Fourier Transform



شکل ۱ ساختار سیگنال GPS [۱۰]

که به صورت زیر توصیف می شود [۴، ۵، ۹]:

$$E = \left[ w^*(n)w(n+1) \right] = \sigma^2 \delta(\ell)$$

$$E = [w(n)] = 0 \quad (2)$$

توسط بردار رسیده به گیرنده علاوه بر دامنه و فاز جمر، می توان زیرفضای جمر را محاسبه کرد. اگر L داده نمونه برداری شده در یک سمبل به Q بلوک هر یک به طول P تقسیم شوند، می توان جمر را از Q بلوک که یک نماد را تشکیل می دهد، حذف کرد. ماتریس زیرفضای بلوک K<sup>م</sup> به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_K = I - \frac{u u^H}{K K} \quad (3)$$

بردار u<sub>k</sub> بردار نرم پایه واحد در جهت بردار تداخل بلوک K<sup>م</sup> است [۴، ۸، ۱۰] و علامت H بالای بردار نشان دهنده ماتریس هرمیتی (مزدوج ترانهاده) است. ابتدا فرض می کنیم که اطلاعات دقیق مربوط به IF جمر و در نتیجه بردار صحیح جمر را در دست داریم. جمر i<sup>م</sup> بلوک k<sup>م</sup> به صورت زیر مشخص می شود [۴، ۵، ۸]:

$$u_k(i) = \frac{1}{\sqrt{P}} \exp[j\phi_k(i)] \quad (4)$$

بیانگر فاز جمر و P بیانگر طول رشته کد

گیرنده GPS سیگنالهای طیف گسترده رشته مستقیم<sup>۱</sup> مدوله شده BPSK<sup>۲</sup> را استخراج می کند. کد C/A یک رشته PN پریودیک است. کد PN با طول ۱۰۲۳، در هر نماد داده (با نرخ انتقال ۵۰ bps) ۲۰ مرتبه تکرار می شود (یعنی هر کد PN در نماد داده، ۲۰ بار تکرار می شود).

نرخ چیب C/A برابر ۱/۰۲۳MHz و نرخ کد P(Y) برابر ۱۰/۲۳MHz است. از آنجا که بیشینه طیف چگالی توان کد C/A حدود ۱۳dB بیشتر از بیشینه طیف چگالی توان کد P است، ما حذف جمر کد C/A را بررسی می کنیم. سیگنال GPS توان کمتری دارد و JSR آن ۴۰dB و SNR آن -۱۴dB تا -۲۰dB است. وقتی JSR بسیار بزرگ باشد، جمر FM مشخصه واضحی در حوزه t-f دارد و براحتی می توان آن را حذف کرد [۷-۹].

سیگنال یک سمبل داده بعد از دمدولاسیون و نمونه برداری به شکل زیر تبدیل می شود:

$$x(n) = p(n) + w(n) + j(n) \quad 1 \leq n \leq L \quad (1)$$

p(n) رشته چیب و j(n) سیگنال تداخلی و w(n) نویز سفید گوسی مختلط با متوسط صفر و واریانس  $\sigma^2$  است

1. Direct Sequence Spread Spectrum(DSSS)  
2. Binary Phase Shift Keying

تخت در نظر می‌گیریم. LNQ نمونه‌های خروجی سنسور، به Q بلوک با L چیپ و LN نمونه تقسیم می‌شوند. با طراحی داده‌های رسیده به صورت متعامد بر زیرفضای جمر، جمر از ۲۰ بلوک که بیانگر یک سمبل داده است، [۱۰، ۱۱] حذف می‌شود. بردار آرایه‌ای خروجی k امین نمونه چنین است:

$$x(k) = x_s(k) + x_u(k) + b(k) \\ = c(k)h + \sum_{i=1}^U A_i u_i(k) a_i + b(k) \quad (9)$$

$x_s$  و  $x_u$  و  $b$  به ترتیب بیانگر سیگنال، جمر و نویز گوسی سفید هستند.  $h$  مشخصه فضایی سیگنال و  $c(k)$  رشته PN گسترش یافته است. U بیانگر تعداد جمرها است. تمامی جمرها، سیگنالهای FM باند باریک با دامنه ثابت هستند که قبلاً بحث شد [۱۰، ۱۲].

$A_i$  دامنه i امین جمر و  $a_i$  مشخصه فضایی جمر است. کانال را نرمالیزه و به صورت  $\|a\|_F^2 = N$  و  $\|h\|_F^2 = N$  تنظیم می‌کنیم، بیانگر نرم فروبینیوس<sup>۱</sup> بردار است. بردار نویز  $b(k)$  دارای متوسط صفر و توان  $\sigma^2$  است [۴، ۵].

با L نمونه برداری از سیگنال داریم:

$$X = [x^T(1) \ x^T(2) \ \dots \ x^T(L)]^T = x_s + x_u + B \quad (10)$$

بردار  $X_u$  شامل U سیگنال جمر است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_i = [u_i(1) \ u_i(2) \ \dots \ u_i(L)]^T \otimes a_i \quad (11)$$

$X_u = \sum_{i=1}^U V_i$  ضرب کرونکر<sup>۲</sup> است. و  $V = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_u]$  است. ماتریس زیرفضای متعامد برای آنتن‌های آرایه‌ای، در مراجع به صورت زیر تعریف شده است [۵، ۹، ۱۰]:

GPS است. بردار سیگنال رسیده در زیرفضای متعامد به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\bar{X}_K = V_K x_K = V_K (p_K + w_K + j_K) \quad (5)$$

$x_K$  بردار داده بلوک K ام رسیده به گیرنده و  $p_K$  و  $w_K$  و  $J_K$  سه عنصر اصلی بلوک K ام است که بردار ورودی را تشکیل می‌دهند. با فرض اینکه اطلاعات مربوط به IF جمر را دقیقاً می‌دانیم، تداخل کلی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\bar{X}_K = V_K (p_K + w_K) \quad \text{و} \quad V_K J_K = 0 \quad (6)$$

خروجی همبسته‌ساز به روش همبسته‌سازی  $\bar{X}_K$  با رشته چیپ بلوک K ام و جمع کردن نتایج در K بلوک حاصل می‌شود:

$$y = \sum_{K=0}^{Q-1} \bar{X}_K^H P_K = \sum_{K=0}^{Q-1} P^T V_K P + \sum_{K=0}^{Q-1} W^H V_K P = y_1 + y_2 \quad (7)$$

$y_1$  و  $y_2$  به ترتیب نشان‌دهنده رشته PN و نویز در متغیر تصمیم‌گیری هستند و T نشان دهنده بردار یا ماتریس انتقال است. متغیر تصمیم‌گیری  $y_r$ ، قسمت حقیقی  $y$  یعنی  $y_r = \text{Re}\{y\}$  است. و می‌توان نشان داد که SINR به صورت زیر است [۵]:

$$\text{SINR} = \frac{E^2[y_r]}{\text{Var}[y_r]} = \frac{y_1^2}{\text{Var}\{\text{Re}[y]\}} = 2P \left[ Q - \sum_{K=0}^{Q-1} |B_K|^2 \right] / \sigma^2 \\ \beta_K = \frac{P^T u_K}{\sqrt{P}} \quad (8)$$

$\beta_K$  ضرایب همبستگی بین رشته PN و بردار جمر  $u$  است. در معادله (۷)  $y_1$  قابل پیش‌بینی است در حالی که  $y_2$  متغیری تصادفی است. یکی از تفاوت‌های حذف تداخل در سیستم‌های مخابراتی و سیستم GPS این است که در سیستم‌های مخابراتی هر دو متغیر  $y_1$  و  $y_2$  متغیرهایی تصادفی هستند [۵، ۱۰].

### ۳- استفاده از آنتن‌های آرایه‌ای در حذف

#### جمر به روش زیرفضا

آنتن آرایه‌ای با N سنسور و کانال مخابراتی را با فیدینگ

1. Frobenius Norm

2. Kronecker Product

همبستگی لحظه‌ای بین رشته PN و بردار جمر  $i$  ام است. از معادله بالا می‌توان نتیجه گرفت که  $y_1$  مقداری حقیقی است و این به دلیل خواص هرمیتی ماتریس  $P$  می‌باشد. خروجی  $Q$  بلوک چنین است:

$$y_r = \text{Real}[y], \quad y = \sum_{m=1}^Q y_m \quad (19)$$

امید ریاضی  $y_r$  برابر است با [۹، ۱۰]:

$$E[y_r] = E[y] = \sum_{m=1}^U y_m = LN \left( Q - \sum_{m=1}^Q \sum_{i=1}^U |\alpha_{mi}|^2 |\beta_{mi}|^2 \right) \quad (20)$$

$$= LN \left[ Q - \sum_{i=1}^U \left( |\alpha_i|^2 \sum_{m=1}^Q |\beta_{mi}|^2 \right) \right]$$

و واریانس  $y_r$ :

$$\sigma_{y_r}^2 = \frac{1}{2} \sigma_y^2 = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^Q \sigma_{y_m}^2 \quad (21)$$

$$= \frac{1}{2} \sigma^2 LN \left[ Q - \sum_{i=1}^U \left( |\alpha_i|^2 \sum_{m=1}^Q |\beta_{mi}|^2 \right) \right]$$

بنابراین نسبت SINR بعد از حذف جمر و فشردگی طیف چنین است [۵، ۹، ۱۰]:

$$\text{SINR} = \frac{E^2[y]}{\text{Var}[y]} = \frac{2LN \left[ Q - \sum_{i=1}^U \left( |\alpha_i|^2 \sum_{m=1}^Q |\beta_{mi}|^2 \right) \right]}{\sigma^2} \quad (22)$$

عبارت  $2LN \sum_{i=1}^U \left( |\alpha_i|^2 \sum_{m=1}^Q |\beta_{mi}|^2 \right)$  در معادله بالا

باعث کاهش عملکرد سیستم می‌شود و ما سعی می‌کنیم این عبارت را حداقل کنیم. باید توجه داشت که اگر جمر و سیگنالهای DSSS بر هم متعامد باشند، هر دو ضریب  $\alpha_i, \beta_i$  صفر می‌شوند ( $\alpha_i = 0, \beta_i = 0$ ) و عملیات حذف تداخل بدون هیچ افتی در عملکرد صورت می‌گیرد. در حالت کلی  $\beta_{im}$  بسیار کوچکتر از  $\alpha_{im}$  است. استفاده از آرایه‌ها باعث تخمین دقیق IF جمرها می‌شوند؛ بهره آرایه‌ای بالای گیرنده‌های چند سنسوری، موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شوند.

$$P = I_{LN} - V(V^H V)^{-1} V^H = I_{LN} - \frac{1}{LN} V V^H \quad (12)$$

با این تعریف، عبارت  $P X_u$  صفر نمی‌شود. ما رابطه بالا را به منظور حذف جمینگ اصلاح و عبارت:

$$P = I_L \otimes O_N - V(V^H V)^{-1} V^H \quad (13)$$

$$= I_L \otimes O_N - \frac{1}{LN} V V^H$$

را در شبیه‌سازی استفاده کردیم. مقدار  $P X_u$  حدود به  $10^{-13}$  رسید، یعنی در عبارت  $P X$  عبارت مربوط به نویز، با تقریب خوبی حذف شد. در رابطه بالا  $O_N$  ماتریس مربعی واحد  $N \times N$  است.

بردار سیگنال رسیده در زیرفضای متعامد به صورت زیر است:

$$X \perp = P X = P X_s + P B \quad (14)$$

بردار سیگنال  $X_s$  به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$X_s = [c(1)c(2)\dots c(L)]^T \otimes h = q \quad (15)$$

بردار  $q$  مبین مشخصه فضایی لحظه‌ای سیگنال GPS است.  $y_1$  چنین است [۹، ۱۰]:

$$y_1 = q^H P q = q^H \left( I_{LN} - \frac{1}{LN} V V^H \right) q \quad (16)$$

$$= q^H q - \frac{1}{LN} q^H \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_u \end{pmatrix} q$$

و سرانجام  $y_1$  به عبارت زیر تبدیل می‌شود

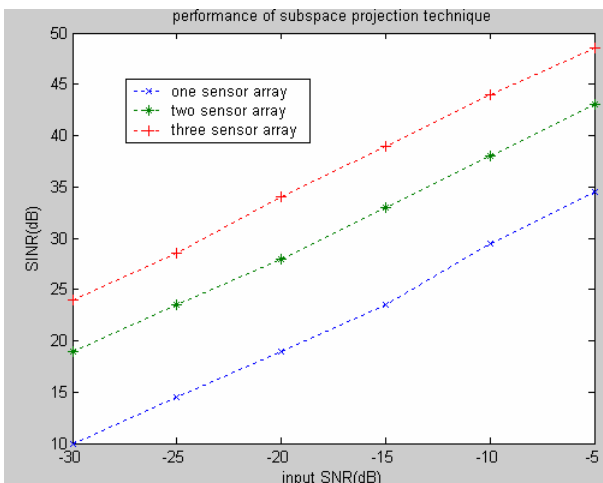
$$y_1 = LN - LN \sum_{i=1}^U |\alpha_i|^2 |\beta_i|^2 = LN \left( 1 - \sum_{i=1}^U |\alpha_i|^2 |\beta_i|^2 \right) \quad (17)$$

$$q^H V_i = LN \alpha_i \beta_i \quad (18)$$

که  $\alpha_i = \frac{h^H a_i}{N}$  بیانگر ضرایب همبستگی فضایی بین

سیگنال و  $i$  امین جمر و  $\beta_i = \frac{P^T u_i}{L}$  بیانگر ضرایب

می‌باشد. به ازای SNR ورودی ۳۰dB- میزان SINR خروجی تک آنتن ۹/۷۶ dB است، اما با به‌کار بردن آرایه دو آنتنی، عملکرد سیستم به ۱۸/۸dB می‌رسد، در حالی که برای آنتن ۳ آرایه‌ای این مقدار به ۲۴/۱dB می‌رسد. همچنین برای SNR ورودی ۵dB-، مقادیر SINR خروجی برای تک آنتن و آرایه دو آنتنی و آرایه سه آنتنی به ترتیب به ۳۴/۹dB و ۴۳/۷dB و ۴۸/۸dB می‌رسد. همانگونه که در شکل ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، به عنوان مثال وقتی SNR ورودی برابر ۲۰dB- باشد، SINR سیستم تک آنتنی ۱۹/۷dB است، در حالی که برای همین سیستم با خطای تخمین IF، مقدار SINR خروجی به ۱۳/۳dB می‌رسد که افت شدیدی را در عملکرد سیستم نشان می‌دهد.



شکل ۲ اثر تعداد آنتن‌ها در عملکرد حذف جمینگ به روش زیرفضا

هر چه SNR ورودی را کمتر کنیم، این افت عملکرد بیشتر می‌شود؛ اما استفاده از آنتن‌های آرایه‌ای، افت عملکرد را تقلیل می‌دهد. برای SNR ورودی ۲۰dB- عملکرد آرایه دو آنتنی ۲۸/۷dB است در حالی که با همین SNR ورودی در سیستم دو آنتنی با خطای تخمین IF، عملکرد سیستم به ۲۳/۹dB می‌رسد.

#### ۴- اثر خطای تخمین IF

وقتی در تخمین IF دچار خطا شویم، دیگر عملکرد حذف جمر به روش زیرفضا، قادر به حذف کل جمر نیست [۹]. بردار تخمینی جمر چنین است:

$$\hat{u}^T = \frac{1}{\sqrt{L}} [e^{j(\phi(1)+\Delta(1))} \quad e^{j(\phi(2)+\Delta(2))} \quad \dots \quad e^{j(\phi(p)+\Delta(p))}] \quad (23)$$

خطای تخمین فاز  $(\Delta(i))$  در چیپ‌های مختلف به صورت متغیرهای تصادفی i.i.d با توزیع گوسی متوسط صفر و واریانس  $\sigma_e^2$  در نظر گرفته می‌شود. در مراجع بردار جمر تقریبی، از ماتریس حذف کننده جمر به صورت زیر ساخته شده است:

$$\hat{V} = I_{LN} - \frac{1}{LN} \hat{u} \hat{u}^H \quad (24)$$

$$\hat{u} = \hat{u} \otimes a$$

با این تعریف، عبارت  $\hat{V} X_u$  صفر نمی‌شود. ما رابطه بالا را به منظور حذف جمینگ اصلاح کرده و عبارت  $\hat{V} = I_L \otimes O_N - \frac{1}{LN} \hat{u} \hat{u}^H$  را در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار دادیم. مقدار  $\hat{V} X_u$  به حدود صفر رسید، یعنی در عبارت  $\hat{V} X_u$  عبارت مربوط به نویز، با تقریب خوبی حذف شد. در رابطه بالا  $O_N$  ماتریس مربعی واحد  $N \times N$  است. خروجی همبسته یک بلوک چنین است:

$$y = x_s^H \hat{v} x_s + x_s^H \hat{v} w + x_s^H \hat{v} x_u = y_1 + y_2 + y_3 \quad (25)$$

$y_1$  و  $y_2$  و  $y_3$  به ترتیب بیانگر نقش کد طیف گسترده و رشته نویز و سیگنال تداخلی در خروجی است. به خاطر خطای تخمین فاز، این سه عبارت متغیرهایی تصادفی هستند [۹، ۱۰].

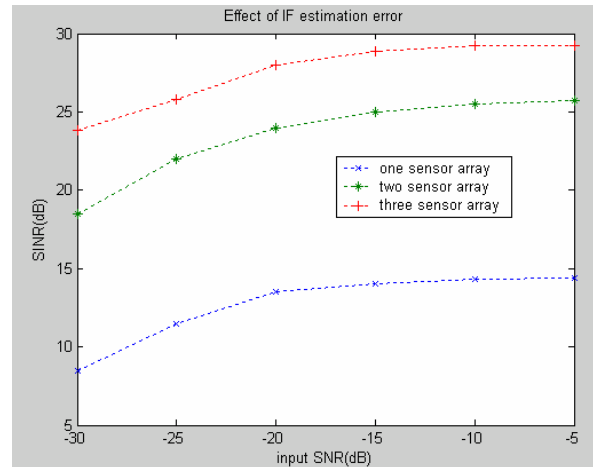
#### ۵- نتایج شبیه‌سازی

همانگونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، با افزایش تعداد آنتن‌های آرایه‌ای، عملکرد سیستم از نظر SINR بهبود

۴/۸dB می‌رسد (SINR خروجی از ۲۸/۷dB به ۲۳/۹dB رسیده است).

جدول ۱ عملکرد گیرنده (SINR خروجی) را بر حسب مقادیر مختلف SNR ورودی گیرنده GPS برای گیرنده‌های تک آنتنی و دو آنتنی و سه آنتنی نشان می‌دهد. همچنین عملکرد گیرنده بر حسب مقادیر مختلف SNR ورودی گیرنده GPS و برای گیرنده تک آنتنی و دو آنتنی و سه آنتنی با خطای تخمین IF و همچنین عملکرد گیرنده برای سیستم دو جمری با دو آنتن گیرنده به ازای ۲۰۰ تکرار شبیه‌سازی شده است.

افزایش تعداد مولدهای جمر، باعث کاهش افت عملکرد سیستم می‌شود. به عنوان مثال برای سیستم تک جمری با دو آنتن در SNR ورودی -۳۰dB، SINR خروجی برابر ۱۸/۸dB است؛ در حالی که برای همین حالت با دو مولد جمر، SINR به ۹/۱dB تقلیل می‌یابد. در SNR ورودی -۲۰dB عملکرد سیستم از ۲۸/۷dB به ۱۸/۸dB، برای مولد جمر دوتایی می‌رسد.



شکل ۳ اثر تعداد آنتن‌ها در عملکرد حذف جمینگ به روش زیرفضا با وجود خطای تخمین IF

با مقایسه این نتایج، مشخص می‌شود که در سیستم تک آنتنی با وجود خطای IF، برای SNR ورودی -۲۰dB، افت عملکردی برابر ۶/۴dB نسبت به حالت بدون خطای IF مشاهده می‌شود (SINR خروجی از ۱۹/۷dB به ۱۳/۳dB رسیده است)؛ در حالی که در سیستم دو آنتنی با SNR ورودی -۲۰dB، افت عملکرد سیستم با خطای تخمین IF، نسبت به حالت بدون خطای تخمین IF به

جدول ۱ عملکرد گیرنده (SINR خروجی) بر حسب مقادیر مختلف SNR ورودی گیرنده GPS برای گیرنده‌های تک آنتنی و دو آنتنی و سه آنتنی و گیرنده با خطای تخمین IF (گیرنده تک، دو و سه آنتنی) و سیستم دو جمری با دو آنتن گیرنده (شبیه‌سازی‌ها برای ۲۰۰ تکرار انجام شده است)

SINR ورودی گیرنده	-۳۰dB	-۲۵dB	-۲۰dB	-۱۵dB	-۱۰dB	-۵dB
SINR خروجی گیرنده تک آنتنی	۹/۶dB	۱۴/۸dB	۱۹/۷dB	۲۴/۷dB	۲۹/۵dB	۳۴/۸dB
SINR خروجی گیرنده دو آنتنی	۱۸/۸dB	۲۳/۶dB	۲۸/۷dB	۳۳/۷dB	۳۶/۶dB	۴۳/۷dB
SINR خروجی گیرنده سه آنتنی	۲۴/۱dB	۲۸/۹dB	۳۴dB	۳۸/۹dB	۴۲/۹dB	۴۸/۹dB
SINR خروجی با خطای تخمین IF (گیرنده تک آنتنی)	۸/۵dB	۱۱/۵dB	۱۳/۳dB	۱۴/۱dB	۱۴/۳dB	۱۴/۴dB
SINR خروجی با خطای تخمین IF (گیرنده دو آنتنی)	۱۷/۹dB	۲۱/۶dB	۲۳/۹dB	۲۵/۱dB	۲۵/۵dB	۲۵/۷dB
SINR خروجی با خطای تخمین IF (گیرنده سه آنتنی)	۲۲/۹dB	۲۶dB	۲۷/۹۶dB	۲۸/۸۴dB	۲۹/۱۵dB	۲۹/۲۵dB
SINR خروجی گیرنده دو آنتنی با دو مولد جمر	۹/۱dB	۱۳/۹۵dB	۱۸/۸dB	۲۳/۹dB	۲۹/۱dB	۳۴dB

## ۶- نتیجه گیری

برای حذف جمرهای FM باند باریک از روش زیرفضای متعامد بر جمر استفاده می‌شود. در این روش ماتریس متعامد بر جمر باید محاسبه شود. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، هر چه تعداد آنتن‌های آرایه افزایش یابد عملکرد سیستم از نظر SINR بهبود می‌یابد؛ هر چند پیچیدگی سیستم نیز بالا می‌رود. همچنین خطای تخمین IF در گیرنده باعث افت شدیدی در عملکرد سیستم گیرنده می‌شود. وقتی خطای تخمین IF وجود داشته باشد، استفاده از گیرنده‌های چند آنتنی باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد سیستم می‌شود. اگر تعداد مولدهای جمری که سیستم گیرنده را تحت تأثیر قرار می‌دهند، افزایش یابد؛ افت شدیدی در عملکرد سیستم ایجاد می‌شود.

## ۷- منابع

- [6] S. J. Kim, and R. A. Iltis; "GPS C/A Code Tracking With Adaptive Beamforming and Jammer Nulling"; *IEEE*; 2002; pp.975-979.
- [7] E. D. Kaplan; *Understanding GPS Principles and Applications*; Artech House, Boston, London, 1996.
- [8] L. Zhao, M. G. Amin, and A. R. Lindsey; "Subspace Projection Techniques for Anti-FM Jamming GPS Receivers"; *Air Force Reserch Laboratory/IFGC, USA, IEEE*; 2000; pp.529-533.
- [9] M. G. Amin, L. Zhao, and A. R. Lindsey; "Performance Analysis of Subspace Projection Techniques for Anti-jamming GPS Using Spatio-Temporal Interference Signatures"; *Air force Reserch Laboratory, Information Directorate, Rome, NY, IEEE*; 2001; pp.361-364.
- [10] L. Zhao, M. G. Amin, A. R. Lindsey, and Y. Zhang; "Subspace Array Processing for the Suppression of FM Jamming in GPS Receivers"; *Air Force Reserch Laboratory, USA, IEEE*; 2000; pp.1000-1004.
- [11] A. Gecan, P. Flikkema; "Jammer Cancellation With Adaptive Arrays for GPS Signals"; *IEEE*; 1996; pp.320-323.
- [12] R.L. Fante, and J. J. Vacarro; "Cancellation of Jammers and Jammer Multipath in a GPS Receiver"; *IEEE AES Systems Magazine*; Nov. 2000; pp. 514-518.
- [13] Y. Zhang, M. G. Amin, and A.R.Lindsey; "Anti-Jamming GPS Recievers Based on Bilinear Signal Distributions"; *Air Force Reserch Laboratory, IEEE*; 2001; pp.1070-1074.
- [1] A. Kandangath; "Jamming Mitigation Techniques for Spread Spectrum Communication Systems"; *IEEE, Signal Processing for Wireless Communications*; 2003; pp.1-13.
- [2] M. G. Amin, C. Wang, and A. R. Lindsey; "Optimum Interference Excision in Spread Spectrum Communication Using Open-Loop Adaptive Filters"; *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 47, No.7; July. 1999; pp.80-92.
- [3] R. S. Ramineni, M. G. Amin, and A. R. Lindsey; "Performance Analysis of Subspace Projection Techniques for Interference Excision in DSSS Communications"; *Air Force Research Lab of US, IEEE*; 2000; pp.2825-2828.
- [4] M. G. Amin, L. Zhao, and A. R. Lindsey; "Subspace Array Processing for the Suppression of FM Jamming in GPS Receivers"; *IEEE Transactions on aerospace and electronic Systems*, Vol. 40, No.1; Jan. 2004 ; pp.80-92.
- [5] L. Zhao, M. G. Amin, and A. R. Lindsey;