

مقاله علمی - پژوهشی

# طراحی آنتن ضد اختلال GPS غیر مسطح با استفاده از آنتن‌های جهت‌دار

علی صادق‌زاده مقدم<sup>۱</sup>، سیدحسین صدیقی<sup>۲\*</sup>، محمد سلیمانی<sup>۳</sup>

۱-۳- دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\*sedighy@iust.ac.ir

در این مقاله آنتنی با هفت عنصر برای دریافت سیگنال GPS روی ساختاری غیر مسطح طراحی شده است که در برابر جمینگ مقاوم بوده و با قطع و وصل کردن تغذیه‌ی عنصرها در زوایای فراز و سمت مشخصی ایجاد صفر در الگوی تشعشی می‌کند. در این ساختار از هفت آنتن پچ استفاده شده است که هر کدام روی یک وجه ساختار قرار می‌گیرند و هر عنصر به کمک یک تغذیه قطبش دایروی قابل قبول برای دریافت سیگنال GPS را ایجاد می‌کند. هرچه آنتن‌های به کار رفته در این ساختار جهت‌دارتر باشد، صفر الگوی تشعشی عمیق‌تری ایجاد خواهد شد و در نتیجه مقاومت بیشتری در برابر سیگنال جمینگ به دست خواهد آمد. به دلیل ساختار ساده، وزن کم، ابعاد فشرده، قطبش دایروی، بهره بالا و مقاومت در برابر جمینگ، این ساختار برای به کارگیری در گیرنده‌های GPS مناسب است.

واژه‌های کلیدی: آنتن پچ، آنتن جهت‌دار، سوئیچ، GPS

## علائم و اختصارات

Global Position System (GPS)	سیستم موقعیت‌یاب جهانی
Direction of Arrival (DOA)	تخمین جهت ورود
Global Navigation Satellite System (GNSS)	سیستم ناوبری ماهواره‌ای جهانی (روسیه)
Galileo Navigation System (Galileo)	سیستم ناوبری اروپایی گالیلئو

## مقدمه

سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی از جایگاه بسیار مهمی در دنیای امروز دارند. این سیستم‌ها موقعیت، سرعت و زمان را به سادگی و با هزینه بسیار اندک در هر شرایط آب و هوایی در اختیار کاربران روی

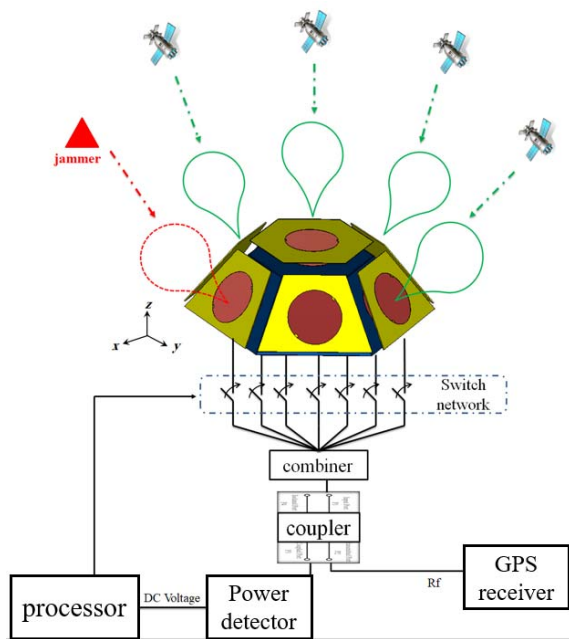
زمین و یا نزدیک زمین قرار می‌دهند. اولین بار این سیستم‌ها در دهه ۱۹۹۰ میلادی توسط آمریکا و با ماهواره‌های GPS شروع به کار کردند و با سرعت زیادی رشد و توسعه یافتند. نکته‌ی مهم این است که گیرنده در اختیار کاربر بایستی امکان دریافت سیگنال از چهار ماهواره‌ی مجزا را داشته باشد. در حال حاضر در کنار سیستم GPS، سیستم ناوبری اروپایی گالیلئو، Glonass (روسیه)، Compass (چین) در حال فعالیت هستند. یکی از عنصرهای اصلی و مهم در سیستم‌های مخابراتی به ویژه گیرنده‌های سیستم‌های ناوبری، آنتن است. در حالت عادی گیرنده‌های GPS با دریافت سیگنال از ماهواره‌های GPS موقعیت کاربر را به درستی نشان می‌دهند. از طرفی برای مختل کردن عملکرد گیرنده‌ی GPS توان بالایی را سمت این گیرنده‌ها ارسال می‌کنند تا موقعیت‌یابی با اختلال روبرو شود. به این نوع ایجاد اختلال در گیرنده‌های GPS جمینگ گفته می‌شود. از این رو طراحی گیرنده‌های GPS مقاوم در برابر جمینگ یکی از چالش‌های طراحان آنتن‌های GPS است. استفاده از آنتن‌های آرایه‌ای روی ساختار مسطح یکی از متداول‌ترین انواع آنتن‌های GPS است که به کمک جهت‌دهی به بیم آنتن‌ها و الگوریتم‌های

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد

۲. دانشیار (نویسنده مخاطب)

۳. استاد

حذف کردن شیفتهنده‌های فاز و مدارات واسط پیچیده از ساختار غیرمسطح و آنتن‌های جهت‌دار استفاده می‌کنیم که باعث می‌شود هم هزینه و هم پیچیدگی سامانه کاهش پیدا کند. در این طرح همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است عنصرهای آنتن روی سطح غیرمسطح و وجوه مختلف یک چند وجهی قرار می‌گیرند.



شکل ۱ - ایده کلی حاکم بر سیستم پیشنهادی

وقتی یکی از عنصرها در معرض توان بالای جمر قرار می‌گیرد، به کمک قطع و وصل کردن تغذیه‌ی آنتن‌ها در الگوی تشعشی در جهت سیگنال جمر صفر ایجاد می‌شود. طبق شبیه‌سازی‌هایی که به کمک نرم‌افزار متلب انجام گرفته است، استفاده از آنتن‌های جهت‌دار منجر به عمق صفر الگوی تشعشی بیشتر می‌شود و هر چه سمت‌گرایی<sup>۴</sup> عنصرها بیشتر باشد، این عمق بیشتر خواهد شد. در این شبیه‌سازی فرض شده است که الگوی تشعشی عنصرها از رابطه‌ی (۱) پیروی می‌کند:

$$U(\theta, \varphi) = \cos^n(\theta) \quad (1)$$

در رابطه (۱) هر چه توان  $n$  بیشتر باشد، الگوی تشعشی عنصر آنتنی جهت‌دارتر شده و پهنای بیم نصف توان آن کمتر می‌شود. با جایگذاری رابطه (۱) در روابط (۲) و (۳) می‌توان سمت‌گرایی تک عنصر را به دست آورد [۴].

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{Prad} \quad (2)$$

$$Prad = \int_0^\pi \cos^n(\theta) d\theta \quad (3)$$

مختلف DOA و استفاده از شیفتهنده‌های فاز در برابر جمینگ مقابله می‌کنند [۱]. آنتن CRPA تولید شده توسط شرکت نوااتل<sup>۱</sup> که از نمونه‌های بسیار پرکاربرد در این حوزه است، هزینه‌ی بالای طراحی و ابعاد نسبتاً بزرگ با قطر ۳۰cm است که کاربرد آن را در موارد زیادی محدود می‌کند. به منظور عملکرد صحیح در زوایای فراز<sup>۲</sup> پایین، بدون نیاز به شیفتهنده‌های فاز، می‌توان از ساختاری غیرمسطح استفاده کرد که عنصرهای آنتن روی وجوه مختلف یک چند وجهی قرار بگیرند تا در راستای زوایای فراز پایین، نیز گیرندگی وجود داشته باشد. در مرجع [۳] تاثیر انحنا ساختار در توانایی آنتن در مقابله با جمینگ مورد بررسی قرار گرفته که پس از بررسی سه نوع انحنای کوژ، کاو و مسطح مشاهده می‌شود که استفاده از ساختار کوژ می‌تواند در زوایای فراز پایین برای مقابله با جمینگ عملکرد بهتری نسبت به حالتی که عنصرها روی ساختار کاو و مسطح هستند داشته باشد. استفاده از ساختار کوژ باعث می‌شود نیازی به شیفتهنده‌های فاز برای تغییر جهت بیم و الگوریتم‌های پیچیده‌ی DOA نباشد که هم هزینه ساخت آنتن و هم پیچیدگی طراحی کاهش پیدا می‌کند.

در این مقاله آنتنی آرایه‌ای طراحی شده است که عنصرهای آن روی ساختاری غیرمسطح با قطر ۱۹/۳cm قرار گرفته‌اند. ابعاد آنتن پیشنهادی نسبت به نمونه‌های موجود (به عنوان مثال آنتن GAJT- 710ML ساخته‌شده توسط شرکت نوااتل که دارای قطر ۲۹ cm است) کوچکتر است [۳]. هر کدام از عنصرهای این آنتن برای اینکه به منظور گیرندگی GPS مناسب باشند، در فرکانس عملکردی ۱۵۷۵ MHz آنتن باید نسبت محوری<sup>۲</sup> زیر ۳dB و تلف برگشتی بالاتر از ۱۰dB داشته باشد. در بخش بعد نشان داده خواهد شد که بهره‌ی تک عنصر یکی از اساسی‌ترین پارامترهای این طراحی است و افزایش بهره با در نظر گرفتن اینکه ابعاد بیش از حد بزرگ نشود از چالش‌های دیگر این طراحی است.

## فلسفه‌ی طراحی

در ساختارهای متداولی که برای مقابله با جمینگ طراحی می‌شوند، از آنتن‌های همه جهته روی سطوح مسطح استفاده می‌شود. در این آنتن‌ها به کمک شیفتهنده‌های فاز و سایر مدارهای واسط، بیم آنتن‌ها جهت‌دهی می‌شوند و در جهتی که جمر به طرف آنتن توان بالایی ارسال می‌کند، ایجاد صفر الگوی تشعشی<sup>۳</sup> کرده و در برابر جمینگ مقابله می‌کنند.

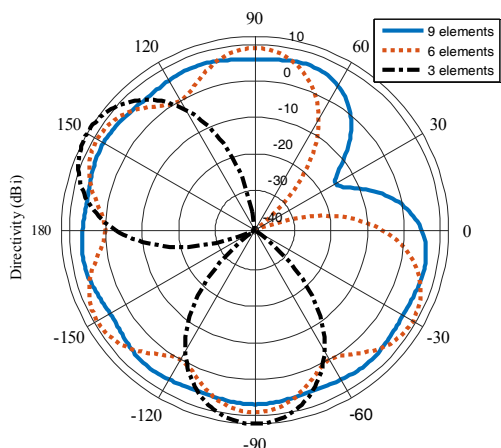
وجود مدارهای واسط و شیفتهنده‌های فاز پیچیدگی و هزینه طراحی را بالا می‌برد. در ایده‌ی مطرح شده در این مقاله، به منظور

1. NOVATEL

2. Axal Ratio

3. Null

4. Directivity



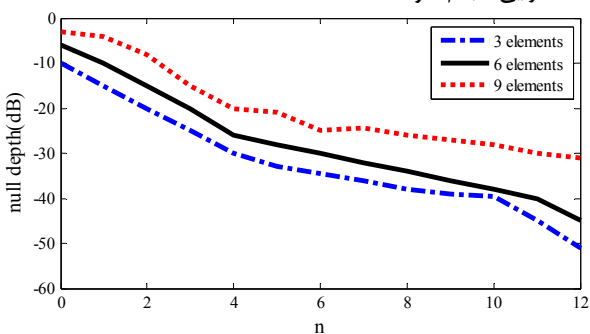
شکل ۴- تأثیر خاموش کردن یک عنصر وقتی سه، شش و نه عنصر در ساختار وجود دارد.

با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌کنیم که هرچه تعداد عناصر کمتر باشد، عمق صفر الگوی تشعشعی بیشتر می‌شود. این در حالی است که اگر تعداد عناصر کم باشد، با خاموش کردن یک عنصر در زوایای فراز بیشتری صفر الگوی تشعشعی ایجاد می‌شود و ماهواره‌های GPS بیشتری از دسترس گیرنده خارج می‌شود [۶]. در عین حال موقعیت‌یابی صحیح، مستلزم دریافت همزمان سیگنال از حداقل چهار ماهواره GPS است. جدول ۱ زوایای فرازی که با خاموشی یک عنصر، صفر الگوی تشعشعی ایجاد می‌شود، به ازای تعداد عنصرهای مختلف نشان می‌دهد.

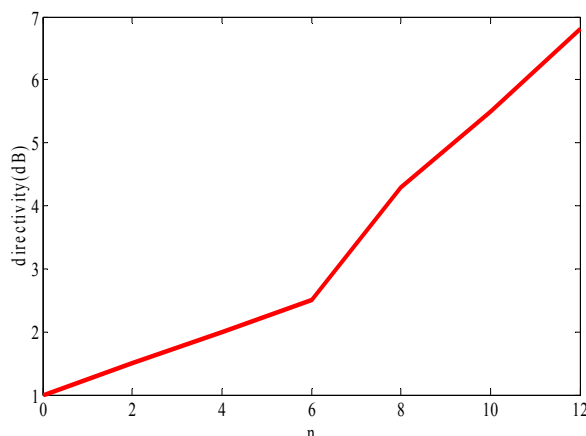
جدول ۱- زوایایی که به ازای تعداد عنصرهای مختلف با خاموشی یک عنصر، صفر الگوی تشعشعی ایجاد می‌شود

تعداد عنصر	صفر الگوی تشعشعی ناشی از خاموشی تک عنصر (درجه)
۳	۱۲۰
۶	۶۰
۹	۴۰

شکل (۵) میزان عمق صفر الگوی تشعشعی به ازای تعداد عنصرها و سمت‌گرایی‌های مختلف را با توجه به شکل (۴) بررسی می‌کند تا به کمک آن مصالحه‌ای بین تعداد عنصرها و میزان سمت‌گرایی انجام شود.



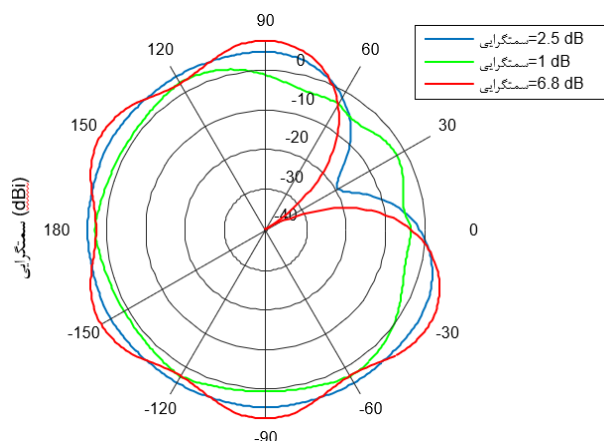
شکل ۵- نمودار مقایسه‌ای عمق صفر الگوی تشعشعی بر حسب مقدار سمت‌گرایی به ازای تعداد عنصرهای مختلف



شکل ۲- نمایش تأثیر افزایش n در سمت‌گرایی

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است افزایش مقدار n منجر به افزایش سمت‌گرایی می‌شود.

در گام بعدی شبیه‌سازی نتیجه‌ی خاموش کردن تغذیه‌ی یک عنصر، به ازای سمت‌گرایی‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد تا نهایتاً مقدار مناسب سمت‌گرایی برای طراحی آنتن به دست آید. به کمک نرم‌افزار متلب شش عنصر با الگوی بهره ارائه شده در شکل (۲) در کنار هم با فواصل  $\lambda/2$  پخش شده‌اند [۵]. افت بهره بر اثر خاموشی یک عنصر به ازای سمت‌گرایی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن در شکل (۳) آورده شده است.



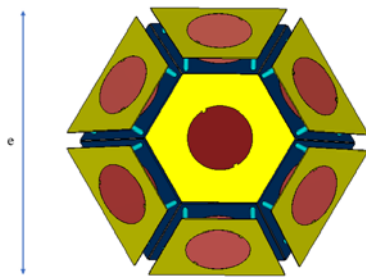
شکل ۳- مقدار عمق صفر الگوی تشعشعی به ازای مقادیر مختلف سمت‌گرایی وقتی تغذیه‌ی یکی از عنصرها خاموش باشد.

همان‌طور که این شکل نشان داده شده است، افزایش سمت‌گرایی تک عنصر باعث می‌شود صفر الگوی تشعشعی عمیق‌تری با خاموش کردن تغذیه‌ی تک عنصر ایجاد شود [۵]. در گام بعدی به منظور بررسی تأثیر تعداد عنصرها در عمق صفر الگوی تشعشعی، شبیه‌سازی را با سمت‌گرایی  $6/8$  dB (n=۱۲) برای تعداد ۳، ۶ و ۹ عنصر تکرار کرده و نتایج را در شکل (۴) بررسی کردیم.

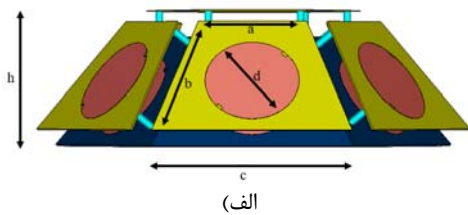
با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها و نمودارها، به منظور مصالحه بین تعداد عنصرها و مقدار سمت‌گرایی، از شش عنصر با سمت‌گرایی بیش از ۶dB در وجوه کناری یک چند وجهی به همراه یک عنصر در وجه بالایی استفاده می‌شود و شبیه‌سازی را به کمک نرم‌افزار CST انجام می‌گیرد. از آنجاکه سمت‌گرایی بالا برای تک عنصر، از چالش‌های طراحی این ساختار است، به منظور افزایش سمت‌گرایی، یک لایه پشته<sup>۱</sup> دقیقاً مانند نمونه اصلی آنتن، با فاصله ۱/۵ سانتی‌متری از سطح آن قرار می‌گیرد با این تفاوت که زیر لایه‌ی آن از جنس Rogers4003 با  $\epsilon_r=3/55$  و ضخامت ۰/۸mm است. این فاصله براساس نتایج شبیه‌سازی حاصل شده است.

### طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی

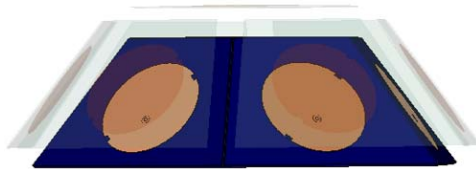
به منظور شبیه‌سازی ساختار کلی آنتن، به کمک نرم‌افزار CST یک عنصر آنتن پچ روی زیرلایه‌ی FR4 با  $\epsilon_r=4/2$  و ضخامت ۱/۶mm شبیه‌سازی کرده و این تک عنصر، روی وجوه یک چند وجهی قرار می‌گیرد تا ساختار کلی مطابق شکل (۷) و (۸) به وجود آید. تغذیه‌ی این تک عنصرها توسط کابل هم محور انجام گرفته است که در شکل (۶) نشان داده شده است [۴]. در ساختار کلی به منظور افزایش بهره و بهبود کارایی آنتن از یک لایه‌ی پشته در روی آنتن اصلی استفاده شده است، تا ساختار کلی مطابق شکل‌های (۷) و (۸) به وجود آید. به منظور ایجاد قطبش دایروی در آنتن، دو برش با ابعاد  $1/6 \times 3/5$  mm در روی سطح آن ایجاد می‌کنیم که به دلیل اختلاف فازی که در جریان سطحی ایجاد می‌شود، قطبش دایروی را ایجاد کنیم. همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است ابعاد لایه‌ی پشته آنتن دقیقاً مانند لایه‌ی زیرین است و فقط جنس زیرلایه‌ی آن متفاوت است.



شکل ۷- ساختار کلی آنتن از نمای بالا

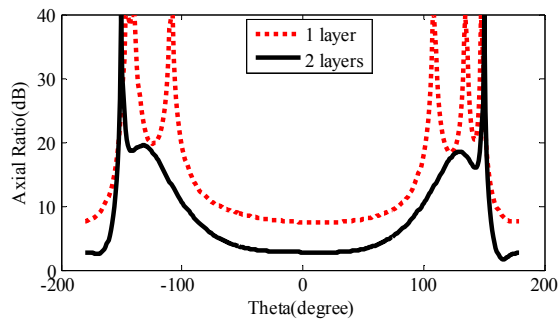


(الف)

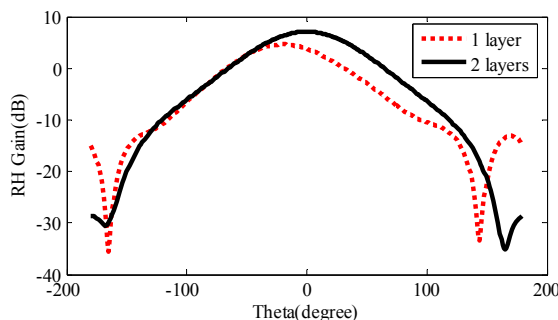


(ب)

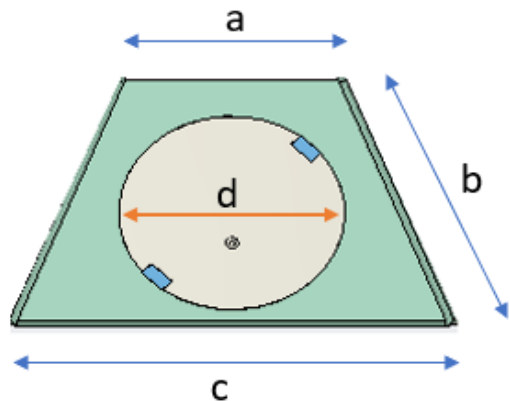
شکل ۸- ساختار کلی آنتن از نمای افق (الف) صفحه بالایی آرایه (ب) صفحه پایینی آرایه  
در نتیجه بر اساس شکل‌های (۹) تا (۱۱) هم بهره افزایش می‌یابد و هم نسبت محوری و ضریب بازگشتی مناسب برای دریافت سیگنال GPS در فرکانس ۱۵۷۵MHz حاصل می‌شود.



شکل ۹- مقایسه‌ی نسبت محوری ساختار تک لایه و دو لایه

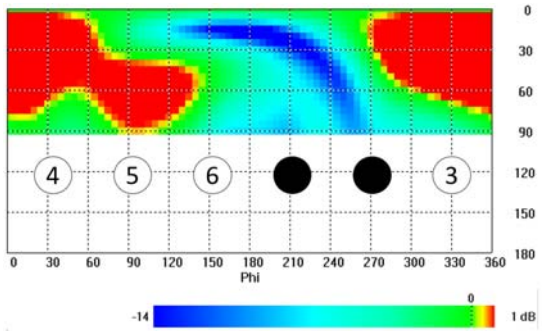


شکل ۱۰- مقایسه‌ی بهره راستگرد آنتن تک لایه و دو لایه



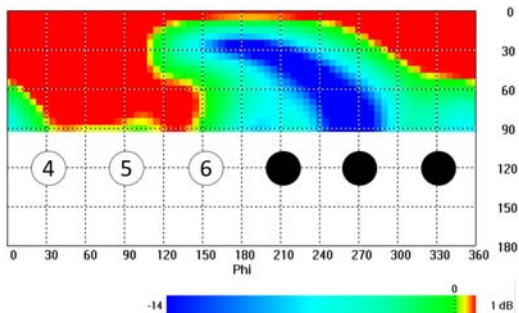
شکل ۶- تک عنصر به کار رفته در ساختار

شکل (۱۳) حالتی را نشان می‌دهد که عنصرها در زوایای  $۰.۳۰.۹۰.۱۵۰.۲۱۰.۲۷۰.۳۳۰$  درجه قرار دارند و تغذیه‌ی عنصر موجود در زاویه‌ی  $۲۱۰$  درجه قطع شده است. در گام بعدی همانطور که در شکل (۱۴) نشان داده است، با قطع کردن تغذیه‌ی دو عنصر کنار هم در زوایای  $۲۱۰$  و  $۲۷۰$  درجه عمق صفر الگوی تشعشی افزایش می‌یابد.

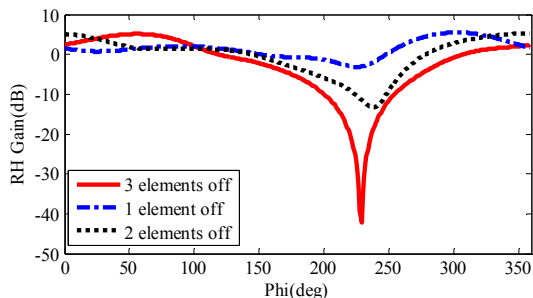


شکل ۱۴- الگوی تشعشی تولید شده وقتی دو عنصر کنار هم تغذیه نشوند

در شکل (۱۵) تغذیه‌ی سه عنصر کنار هم خاموش می‌شوند و در نتیجه عمق صفر الگوی تشعشی با افزایش عنصرهای خاموش، بیشتر می‌شود.



شکل ۱۵- الگوی تشعشی تولید شده وقتی سه عنصر کنار هم تغذیه نشوند.

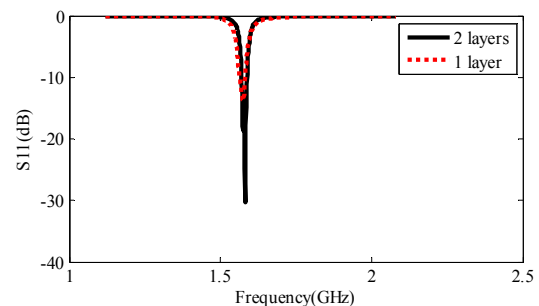


شکل ۱۶- نمودار مقایسه‌ی عمق صفر الگوی تشعشی وقتی تغذیه‌ی ۱، ۲، و ۳ عنصر خاموش هستند.

همان‌طور که در شکل (۱۶) قابل مشاهده است با افزایش تعداد عنصرهای خاموش عمق صفر الگوی تشعشی بیشتر می‌شود. برای دریافت سیگنال GPS سطح توان سیگنال دریافتی در زوایای فراز و سمت مختلف باید طبق جدول (۳) باید باشد [۵].

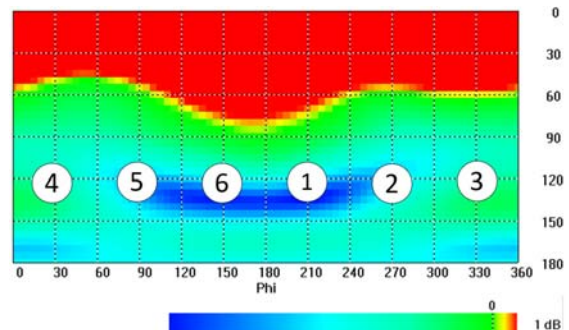
جدول ۲- ابعاد قسمت‌های مختلف آرایه آنتن طراحی شده [۴]

پارامتر	طول (سانتی‌متر)
a	۶
b	۷/۸
c	۱۱
h	۱/۵
e	۱۹/۳
d	۵/۲



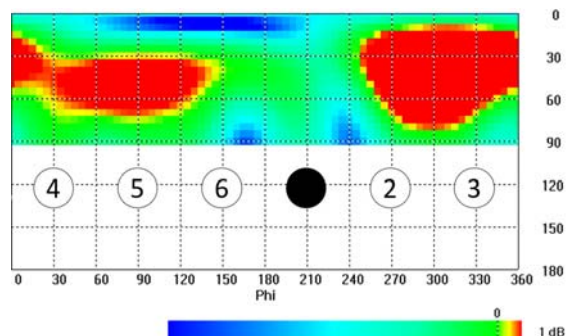
شکل ۱۱- مقایسه‌ی ضریب بازگشتی ساختار تک لایه و دو لایه

مطابق شکل (۱۲) با تغذیه‌ی تمامی عنصرها در زوایای  $0 < \theta < 60$  و  $0 < \phi < 360$  بهره‌ی بالای  $0 \text{ dB}$  ایجاد می‌شود.



شکل ۱۲- الگوی تشعشی تولید شده وقتی همه عنصرها تغذیه شوند.

در گام بعدی همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، قطع کردن تغذیه‌ی عنصر شماره (۱) افت بهره در راستای روبروی این عنصر به وجود می‌آورد.



شکل ۱۳- الگوی تشعشی تولید شده وقتی عنصر یک تغذیه نشوند

## نتیجه گیری

در این مقاله، الگوریتمی برای مقابله با جمنینگ سیگنال‌های GPS ارائه شد که با بهره‌گیری از ساختار خود آنتن و مدارهای واسطه، از شیفت دهنده‌های فاز و الگوریتم‌ها پیچیده‌ی DOA استفاده نمی‌شود و هزینه و پیچیدگی‌های طراحی، تا حد بسیاری کاهش می‌یابد [۶]. قرارگیری عنصرهای آنتن روی ساختاری غیر مسطح و استفاده از آنتن‌های جهت‌دار به طوری که هر کدام از این آنتن‌ها، در راستای روبروی خود، بهره‌ی بالای YdB را ایجاد می‌کنند. و با قطع و وصل کردن تغذیه‌ی آنتن‌ها، در زوایای فراز و سمت مختلف، صفر الگوی تشعشی ایجاد می‌شود. خاموش کردن سه یا دو عنصر کنار هم، بهترین حالت برای عمق صفر الگوی تشعشی است. به کمک میکروکنترلر، سوئیچ‌ها طوری قطع و وصل می‌شوند که تمام حالت‌های خاموشی دو و سه عنصر کنار هم را ایجاد کند. سپس توان دریافتی در تمامی این حالت‌ها بررسی و مقایسه و ثبت می‌شود، و آرایشی که کمترین توان را دارد، به سوئیچ‌ها داده می‌شود و اطلاعات مکانی و زمانی مربوط به آن خوانده می‌شود.

## مراجع

- [1] Brown, A. and Morley, D., "Tes Results of a 7-Element Small Controlled Reception Pattern Antenna," *Proceedings of ION GPS*. 2001.
- [2] Gupta, I.J. and et al., "Non-Planar Adaptive Antenna Arrays For GPS Receivers," *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 52.5 2010, pp. 35-51.
- [3] NovAtel, Products and Technology in Action, Retrieved, 2013, from <http://www.novatel.com/>.
- [4] Balanis, Constantine A., *Antenna theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 2016.
- [5] Rao, B.Rama, Waldemar Kunysz, and K. McDonald, *GPS/NSS Antennas*. Artech House, 2013.
- [6] Contarino, Vincent M., and Pavlo Molchanov, "Multi-Beam Antenna Array for Protecting GPS Receivers from Jamming and Spoofing Signals," *U.S. Patent Application* 13/562,313, filed February 6, 2014.
- [7] Molchanov, P., Contarino, V. and Asmolova, O., "Protected GPS Directional Antenna Array." *Colorado Springs, JSDE/ION Joint Navigation Conference*. 2012.

جدول ۳- مقادیر کمینه و بیشینه بهره به ازای زوایای فراز مختلف [۵]

زوایای فراز (درجه)	کمینه بهره (dBic)	بیشینه بهره (dBic)
>۱۵	-۲	
۱۰	-۳	
۵	-۴، ۵	۵
۰ افق	-۷.۵	-۲
کمتر از ۳۰		-۱۰

با توجه به داده‌های جدول (۳) خاموشی دو عنصر و سه عنصر کنار هم عمق صفر الگوی تشعشی مناسب را ایجاد می‌کنند. برای خاموشی دو عنصر کنار هم، شش حالت و برای سه عنصر کنار هم، شش حالت خاموشی تغذیه‌ها را داریم. آنتن بالایی به منظور ایجاد صفر الگوی تشعشی در زوایای فراز بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد و خاموش و روشن کردن آن منجر به تغییر بهره در زوایای فراز بالا می‌شود. طبق نمودار شکل (۱) سوئیچ‌ها به کمک میکروکنترلر، برای ایجاد این دوازده حالت قطع و وصل می‌شوند و در هر حالت، توان خوانده می‌شود. در پردازنده مقادیر توان هر کدام از این دوازده حالت ثبت می‌شود و آرایشی که کمترین توان را دارد، به سوئیچ‌ها داده می‌شود. سیگنالی که در این حالت دریافت می‌شود به گیرنده GPS داده شده و موقعیت زمانی و مکانی مشخص می‌شود.

چرخه بعدی تغییر آرایش سوئیچ‌ها و ثبت توان‌های دریافتی و مقایسه‌ی آن‌ها باهم با توجه به سرعت پلتفرم و تغییر مکان ساختار می‌تواند تعیین شود.

از سوی دیگر با مقایسه‌ی ابعاد آنتن طراحی شده، با آنتن‌های موجود، به ویژه آنتن GAJT-710ML ساخته شده توسط شرکت نواتل مشاهده می‌کنیم که آنتن شرکت نواتل دارای قطر حدود ۲۹cm است [۳] و آنتن پیشنهادی در این مقاله دارای قطر حدود ۱۹cm است.