

طراحی و پیاده‌سازی آنتن فرستنده لورن چهار دکله به صورت تک قطبی با بار بالایی مربعی

مهدی فرتوک‌زاده^{۱*}، سید حسین محسنی ارمکی^۲، سید محمدجواد رضوی^۳، احیاء یآوری^۴، جلیل راشد محصل^۵

۴-۱- پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۳۰۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۵- استاد، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۵/۰۱/۳۰، پذیرش: ۹۵/۰۳/۲۳)

چکیده: در این مقاله شیوه طراحی و نتایج اندازه‌گیری آنتن لورن با بار بالایی مربعی (STL) که بهبود یافته آنتن فرستنده لورن، بخش بخش شده (SLT) به حساب می‌آید، ارائه شده است. ویژگی طرح پیشنهادی این است که راکتانس آنتن با استفاده از اضافه کردن سیم‌های بالایی بهبود داده شده است. مقایسه بین آنتن پیشنهاد شده و آنتن‌های قبلی نشان می‌دهد که مقاومت تشعشی آنتن تقریباً دو برابر شده و بهره تحقق یافته آن ۶dB افزایش یافته است. آنتن نهایی با ارتفاع ۱۰۰ متر ساخته شده و تصاویر آن ارائه شده است. الگوی تشعشی زمینی این آنتن با استفاده از مکان یابی GPS و محاسبه فاصله نقاط اندازه‌گیری از آنتن و جبران آن‌ها استخراج شده است. الگوی تشعشی به دست آمده متقارن بوده و فقط اثرات اشیاء فیزیکی مثل کوه‌ها و ساختمان‌ها در آن مشاهده می‌شود. به علاوه امپدانس آنتن نیز اندازه‌گیری شده که تطابق خوبی با نتایج پیش‌بینی شده محاسباتی و شبیه‌سازی دارد.

کلید واژه‌ها: آنتن تک‌قطبی، آنتن‌های کوچک، آنتن‌های سیمی، سامانه لورن.

۱- مقدمه

ویژگی مهم سامانه لورن این است که برای اهداف پسیو قابلیت عملکرد دارد، منظور از اهداف پسیو اهدافی است که فقط دریافت کننده سیگنال هستند و سیگنالی را ارسال نمی‌کنند. در سال ۱۹۹۰ سامانه GPS جایگزین سامانه موقعیت‌یابی لورن شد که از ماهواره به عنوان فرستنده استفاده می‌کند. اما هنوز به عنوان پشتیبان برای GPS کاربرد دارد و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. [۱-۳]

امواج ارسالی در این سامانه معمولاً در طیف فرکانس پایین (LF) یعنی بازه فرکانسی بین ۳۰kHz تا ۳۰۰kHz قرار دارد که طول موج آن بین ۱ تا ۱۰ کیلومتر می‌باشد [۴-۵]. بدین لحاظ آنتن مورد استفاده با وجود ارتفاع بلند و اندازه فیزیکی بزرگ، معمولاً جزء آنتن‌های کوتاه یا خیلی کوتاه به حساب می‌آید. به عنوان مثال طول یک آنتن دوقطبی ۱۰۰ متری در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز برابر $\lambda/30$ است که در محدوده $\lambda/50$ و $\lambda/10$ محسوب شده و در زمره آنتن‌های کوتاه قرار می‌گیرد [۶]. اگر چه بزرگ شدن ابعاد، با توجه به میزان توانی که باید تشعشع شود امکان پذیر است ولی تحقق آن دارای محدودیت‌های زیادی در بخش‌های طراحی و ساخت می‌باشد [۷].

انواع آنتن‌های LF که تا کنون معرفی شده اند، عبارت است از آنتن میله فریت [۸]، آنتن حلقوی [۹-۱۰]، آنتن شیپوری [۱۱]، آنتن فنی [۹]، آنتن‌های ریزنوار [۱۲] و آنتن‌های دوقطبی یا تک قطبی [۱۳-۱۸]. اما با توجه به کاربری آنتن در

سامانه موقعیت‌یابی محلی لورن به‌عنوان پشتیبان برای سامانه مکان‌یابی سراسری (GPS) و سامانه‌های ماهواره‌ای نوبری سراسری معرفی شده است. سابقه تاریخی سامانه لورن به جنگ جهانی دوم بر می‌گردد که در آن زمان در دانشگاه ماساچوست ایجاد شد و به آن لورن A گفته می‌شد. لورن C در سال ۱۹۵۰ برای کاربرد غیر نظامی به‌وجود آمد. این سامانه از دقت بالاتری برخوردار بوده به گونه‌ای که لورن A را از رده خارج کرد. این سامانه در بازه فرکانسی ۹۰-۱۱۰ عملکرد دارد.

سامانه لورن C به‌طور کلی برای مکان‌یابی اهداف روی صفحه زمین یا دریا کاربرد دارد و می‌تواند سرعت کشتی‌ها یا اهداف دیگر بر روی زمین مشخص کند. این سامانه می‌تواند انحراف از مسیر را اصلاح کند و زمان رسیدن به مقصد را تخمین بزند که در سامانه‌های دیگری چون رادار، هدایت خودکار، ژيروسکوپ و غیره نیز کاربرد دارد.

سامانه لورن C از زنجیره‌ی سه یا بیشتر ایستگاه زمینی که چندین کیلومتر با هم فاصله دارند تشکیل شده است. یک ایستگاه به عنوان ایستگاه اصلی و بقیه به عنوان ایستگاه‌های تابع شناخته می‌شوند. فرستنده‌های لورن C توانی بین ۲۰۰kW تا ۲MW تشعشع می‌کنند.

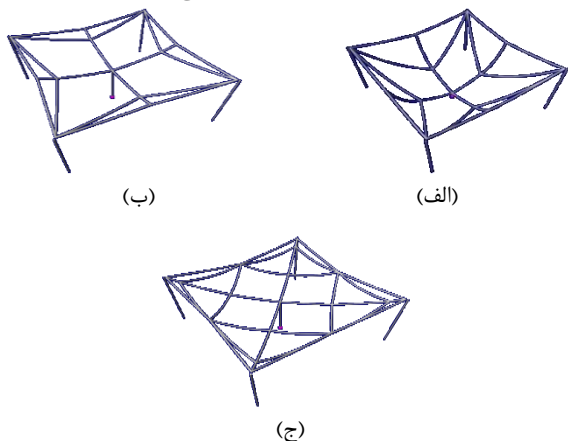
که از تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی برخوردار است.

۲- مقایسه آنتن‌های STL، SLT و STL بهبود یافته

۲-۱- امپدانس آنتن‌ها

در این بخش برای مشخص شدن مزیت آنتن ارائه شده مقایسه روشنی بین آنتن‌های STL، SLT و STL بهبود یافته با ارتفاع و ابعاد یکسان انجام می‌شود. تصویر سه آنتن در شکل (۱) نشان داده شده است. روابط تحلیلی این آنتن‌ها در [۲۵-۲۷] ارائه شده است. توضیحات بیشتر راجع به معادلات سیم‌های معلق نیز در [۲۹-۲۸] موجود است. به علاوه در مورد تاثیر سیم‌های زمین در [۳۰] بحث شده است. البته در [۲۵-۲۷] ابعاد آنتن‌ها متفاوت هستند و مقایسه بین سه حالت با ابعاد مشابه انجام نشده است.

ارتفاع دکل‌های سه آنتن ۱۰۰ متر و فاصله بین آن‌ها ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است. امپدانس شبیه‌سازی شده این آنتن‌ها در طیف فرکانسی مورد استفاده سامانه لورن در شکل (۲) نشان داده شده است. در هر بخش از شکل (۲)، شکل اول امپدانس آنتن بدون در نظر گرفتن دکل‌ها است و در شکل دوم اثر القایی دکل‌ها نیز در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود مقاومت آنتن SLT با دکل‌ها حدود ۰/۶ اهم است. با تغییر ساختار به STL مقاومت به ۱/۱۵ اهم رسیده و تقریباً دو برابر شده است. همچنین مقدار راکتانس آنتن SLT حدود ۱۳۰- اهم است که به ۱۱۰- اهم رسیده است. البته شیب راکتانس کمی زیاد شده که گریز ناپذیر است. در شکل (۲) مشاهده می‌شود سیم‌های اضافه راکتانس را به ۸۰- اهم کاهش می‌دهد که جبران‌سازی و تطبیق امپدانس را راحت‌تر می‌کند.



شکل (۱): آنتن‌های (الف) SLT، (ب) STL و (ج) STL بهبود یافته با سیم اضافه

حالت ارسال، تنها آنتن‌هایی که الگوی تشعشعی یکسان در صفحه افق با قطب‌شدگی عمودی و قابلیت ارسال توان بالا در فرکانس پایین را دارند، باید بررسی شوند. این ویژگی‌ها به‌طور روشن در آنتن‌های دوقطبی و یک‌قطبی دیده می‌شود و آنتن‌هایی که در عمل برای این کار استفاده می‌شود نیز معمولاً بر پایه این دو آنتن هستند.

محدودیت‌های آنتن‌های فرکانس پایین در چهار گروه کلی الکتریکی و الکترومغناطیسی، مکانیکی (مثل استحکام میله‌های بالای آنتن [۱۹]، محیطی (مثل درختان اطراف آنتن [۲۰]) و اقتصادی که کاملاً مستقل نیستند و به هم وابستگی دارند، قابل طبقه‌بندی است. با توجه به موارد فوق در نهایت باید یک تابع ارزش از این مجموعه به دست آید و با در نظر گرفتن حدود مورد نظر آن را بهینه کرد. بیشترین تاکید این مقاله، محدودیت‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی آنتن‌های فرکانس پایین است.

در مقاله ویلر [۲۱] محدودیت‌های آنتن‌های کوتاه بررسی شده است. چو در مقاله خود [۲۲] ضمن بیان کارهایی که برای بهبود عملکرد آنتن‌های کوتاه انجام شده، محدودیت‌های آنتن‌هایی که الگوی تشعشعی یکسان در صفحه افق دارند را بررسی کرده است. هرینگتون نیز تاثیر اندازه آنتن روی پارامترهای مختلف آنتن از جمله بهره، پهنای باند و بازده بیان کرده است [۲۳].

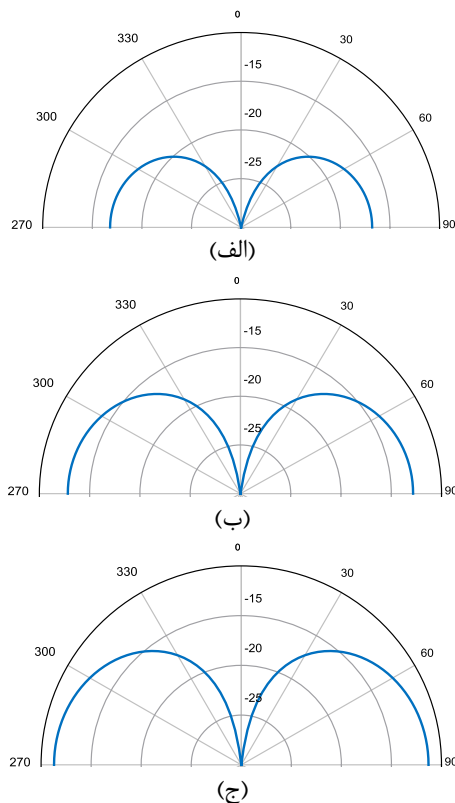
در سامانه فرستنده لورن از طرح‌های متفاوتی برای آنتن استفاده شده که در [۲۴] بررسی شده است. یکی از طرح‌های اولیه برای این سامانه، آنتنی است که مطابق شکل (۱-الف) از سیم‌های معلق بین چهار دکل تشکیل شده است. این آنتن که آنتن بخش‌بخش شده لورن^۱ (SLT) نام دارد، از مزایای بالایی، از جمله عدم نیاز به عایق بودن دکل‌ها از زمین، سادگی ساخت و پهنای باند مطلوب برخوردار است. طرح دیگر آنتن بنام STL که مطابق شکل (۱-ب) از چهار دکل و سیم‌هایی معلق بین آنها و نقطه تغذیه تشکیل شده است هم برای سامانه لورن استفاده می‌شود. با ایجاد تغییراتی در ساختار سیم‌های آنتن فوق مقاومت تشعشعی، راکتانس و بازده آنتن بهبود چشمگیری یافته است. آنتن تغییر یافته در واقع آنتن با بار بالایی مربعی^۲ (STL) است.

در این مقاله ساختار و نتایج اندازه‌گیری آنتن STL بهبود یافته پیاده‌سازی شده ارائه می‌شود. در بخش بعد مقایسه ای بین نتایج شبیه‌سازی آنتن‌های STL، SLT و STL بهبود یافته با سیم‌های اضافه انجام می‌شود. در بخش سوم تصاویری از آنتن STL بهبود یافته که پیاده‌سازی شده به همراه الگوی تشعشعی آن که روی زمین اندازه‌گیری شده است، ارائه می‌شود. به علاوه نتایج اندازه‌گیری امپدانس نیز در انتها ارائه خواهد شد

1. Sectionalized Loran transmitter
2. Square top-loaded antenna

۲-۲- بهره آنتن‌ها

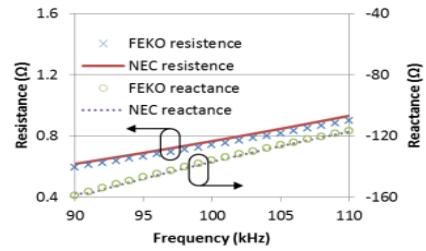
بهره تحقق یافته آنتن‌های SLT، STL و STL بهبود یافته در این بخش با هم مقایسه می‌شود. در شکل (۳) به ترتیب بهره تحقق یافته این آنتن‌ها در فرکانس ۱۰۰kHz نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی از نرم افزار FEKO استفاده شده است. مشاهده می‌شود بهره تحقق یافته آنتن‌ها به ترتیب افزایش می‌یابد. به نحوی که آنتن STL بهبود یافته با بهره تحقق یافته -11.3dB بالاترین بهره را داراست. لازم به ذکر است تمامی آنتن‌های ارائه شده در خانواده آنتن‌های کوچک قرار دارند و بهره‌های پایینی که در این شکل‌ها به دست آمده طبیعی است. البته در مقایسه با طرح‌های قبلی مزیت آنتن ارائه شده کاملاً مشخص است.



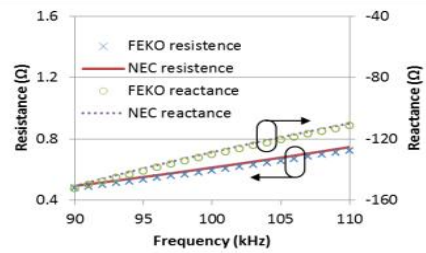
شکل (۳): بهره تحقق یافته آنتن‌های (الف) SLT، (ب) STL، (ج) STL بهبود یافته

۳- اندازه‌گیری آنتن پیاده‌سازی شده

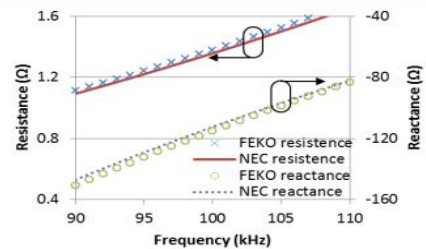
آنتن STL بهبود داده شده در شکل (۱-ج) با ارتفاع ۱۰۰ متر ساخته شده و ابعاد آن در شکل (۴) نشان داده شده است. این ابعاد با استفاده از بهینه‌سازی مقاومت تشعشعی و راکتانس آنتن به دست آمده است. همچنین تصاویر زمینی آنتن در شکل (۵) ارائه شده است. در این تصاویر اتصالات چهار سیم اصلی به سیم‌های بالایی و سیم‌های زمین مشخص است.



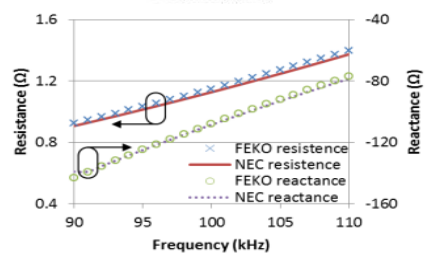
(الف)



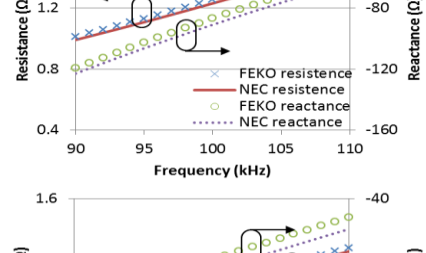
(ب)



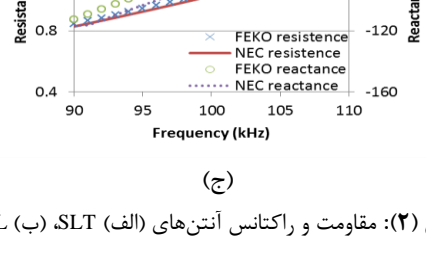
(ب)



(ب)



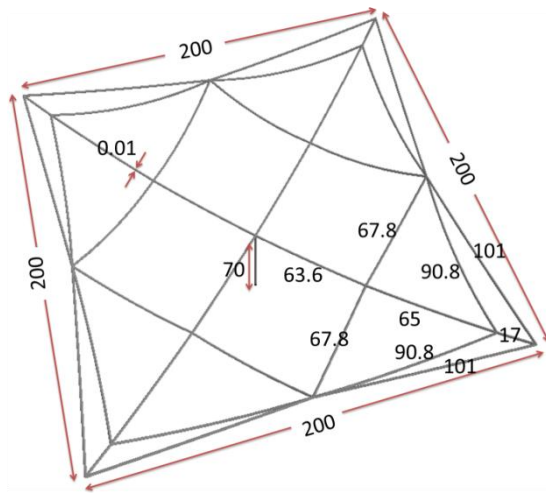
(ب)



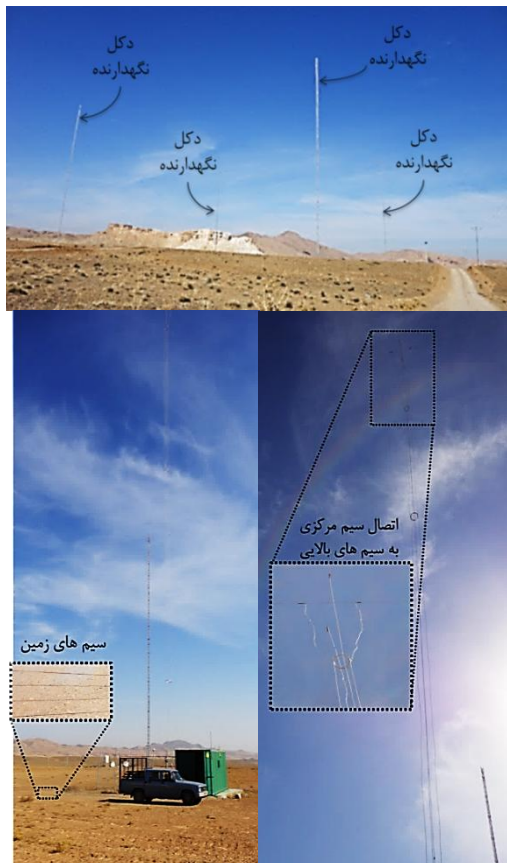
(ب)

شکل (۲): مقاومت و راکتانس آنتن‌های (الف) SLT، (ب) STL، (ج) STL بهبود یافته با سیم اضافه بدون در نظر گرفتن دکله‌ها و با در نظر گرفتن آن‌ها

نوسانات موجود در آن نیز همان طور که گفته شد با توجه به شرایط محیطی قابل قبول است.



شکل (۴): ابعاد آنتن STL پیشنهاد شده (بر حسب متر)



شکل (۵): تصاویر آنتن STL پیشنهاد شده

۳-۱- اندازه گیری الگوی تشعشی

برای اندازه گیری الگوی تشعشی، آنتن در حالت فرستندگی قرار داده و روی نقاط نشان داده شده با ضربدر قرمز رنگ در نقشه‌ای که در شکل (۶) نشان داده شده میزان توان و سیگنال به نوبت دریافتی را ثبت کردیم. این کار با استفاده از دریافت کننده لورن LORADD که محصول شرکت reelektronika است، انجام شد. فرکانس مرکزی پالس مورد استفاده ۱۰۰kHz است که پهنای باند بین ۹۰kHz تا ۱۱۰kHz برای آن در نظر گرفته می‌شود. موقعیت را نیز با استفاده از GPS به دست آوردیم. با محاسبه فاصله هر نقطه با آنتن در شکل و ضرب توان دوم آن در توان ثبت شده برای آن نقطه شدت تشعشع نسبی آنتن در زاویه مربوط به آن نقطه به دست آمد. برای به دست آوردن فاصله از روابط ذیل منطبق بر داده‌های GPS استفاده می‌شود.

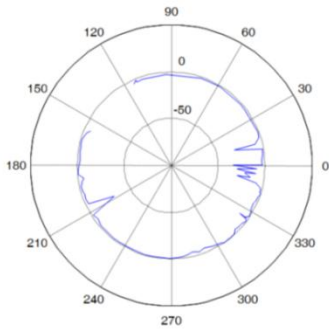
$$\begin{cases} a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \\ c = 2 \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{a}{1-a}}\right) \\ d = Rc \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، φ عرض جغرافیایی، λ طول جغرافیایی و R شعاع زمین یعنی 6,371km است.

در شکل (۷) فاصله نقاطی که در آن‌ها توان آنتن اندازه گیری شده بر حسب زاویه رسم شده است. مشاهده می‌شود فاصله از ۳ کیلومتر تا ۷۴ کیلومتر تغییر کرده است. دامنه توان دریافتی بر حسب دسیبل نیز در شکل (۸) ارائه شده است. نوسانات موجود در شکل به دلیل وجود موانع طبیعی مانند کوه‌ها که بین فرستنده و گیرنده قرار دارند و بعضی از اشیاء مصنوعی مانند ساختمان‌ها و دکل‌ها که نزدیک گیرنده قرار دارند است. البته توان دریافتی تقریباً از ۲۰dB بیشتر است که با توجه به شرایط محیطی و کوه‌های اطراف و همچنین ابعاد آنتن مناسب است.

برای این‌که الگوی تشعشی آنتن را به دست آوریم جهت‌دهی باید محاسبه شود که از ضرب فاصله به توان ۲ در توان دریافتی و به هنجارسازی به دست می‌آید. با توجه به این‌که توان بر حسب db موجود است برای سادگی $20 \log d^2 = 20 \log d$ که در آن d فاصله است را نیز در شکل (۷) رسم کردیم.

در نتیجه کفایت توان دریافتی بر حسب دسیبل و $20 \log d$ که در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شد را با هم جمع کنیم و نسبت به بیشینه به هنجار کنیم که در شکل (۹) این کار انجام شده است. در مجموع الگوی تشعشی omni و قابل قبول است.

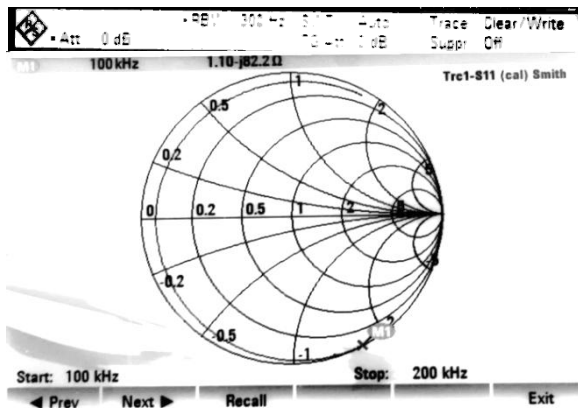


شکل (۹): الگوی تشعشی آنتن روی زمین

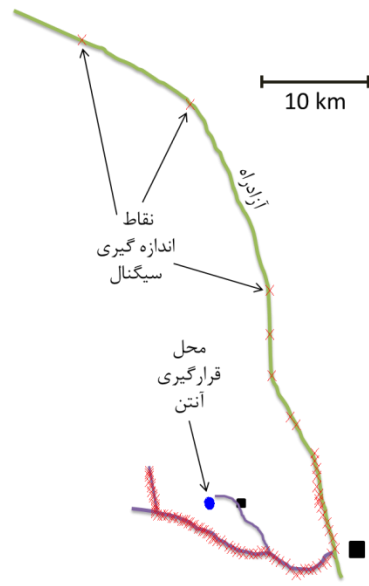
۳-۲- اندازه گیری امپدانس

امپدانس آنتن با استفاده از تحلیل گر شبکه^۱ Rohde-Schwarz اندازه گیری شده است. محدودیت تحلیل گر شبکه مذکور این است که نقطه شروع اندازه گیری از فرکانس ۱۰۰kHz آغاز می شود. لذا فرکانس اندازه گیری از ۱۰۰kHz تا ۲۰۰kHz تنظیم شد که تصویر دیاگرام اسمیت این تحلیل گر شبکه که به آنتن متصل شده است در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در شکل مشخص است که تضعیف قرار داده شده در تحلیل گر شبکه باید برابر ۰ dB باشد و همچنین رزولوشن اندازه گیری در بالاترین حد خود قرار داده شده است که برابر ۳۰ Hz است. در نتیجه امپدانس به دست آمده در فرکانس ۱۰۰Hz برابر $1.1 - j82.2 \Omega$ است که مطابق پیش بینی ها است.

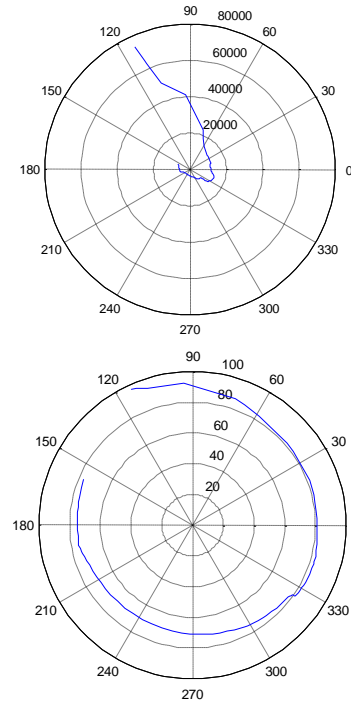
نتایج اندازه گیری و شبیه سازی برای مقایسه بهتر در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به استفاده از چهار سیم مرکزی در پیاده سازی در شبیه سازی نیز ضخامت سیم اصلی آنتن چهار برابر در نظر گرفته شده است. مشاهده می شود مقاومت ها برهم منطبق هستند ولی اختلافی در حدود ۱۰ اهم برای راکتانس ها مشاهده می شود که می تواند ناشی از اختلاف شعاع سیم ها باشد.



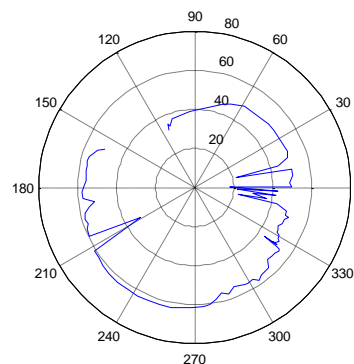
شکل (۱۰): تصویر دیاگرام اسمیت تحلیل گر شبکه متصل شده به آنتن



شکل (۶): محل آنتن و مسیر اندازه گیری در نقشه

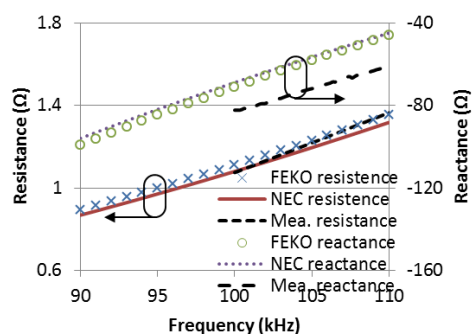


شکل (۷): فاصله از آنتن در نمودار قطبی به صورت خطی و لگاریتمی $(20 \log d)$



شکل (۸): دامنه سیگنال در نمودار قطبی

- [8] A. Stadler, "Radiated Magnetic Field of a Low-Frequency Ferrite Rod Antenna," IEEE Conference, pp. 283-288, 2011.
- [9] M. Ishii and Y. Shimada, "Reference Calibration Methods for Small Circular Loop Antenna in Low-Frequency Band" IEEE Trans. Instrumentation Measurement, vol. 58, no. 4, pp. 1097-1103, Apr. 2009.
- [10] R. Barr, W. Ireland, M.J. Smith, "ELF, VLF and LF radiation from a very large loop antenna with a mountain core," IEE Proceedings-II, vol. 140. No. 2, pp. 129-134, Apr.1993.
- [11] X. Liu, G. Wang, W. Wang, "Design and Performance of TEM Horn Antenna with Low-Frequency Compensation," IEEE, Conference, pp. 306-309, 2003.
- [12] R. Araneo, S. Celozzi, "FE Analysis of a Low-Frequency Microstrip Antenna" IEEE Trans. Magnetics, vol. 38, no. 2, Mar. 2002, pp. 729-732.
- [13] V. Trainotti and L. A. Dorado, "Short low and medium frequency antenna performance," IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 47, pp. 66-90, Oct. 2005.
- [14] B. E. Keiser, "The Spiral-Top Loaded Antenna," Proceedings of the IEEE, pp. 401-402, Apr. 1965.
- [15] H. R. Bhojwani and L. W. Zelby, "Spiral Top-Loaded Antenna: Characteristics and Design," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. ap-21, no. 3, pp. 293-298, may 1973.
- [16] D. E. Hurdsmann, P. M. Hansen, J. W. Rockway, "LF and VLF Antenna Modeling," IEEE Conference, pp. 811-814, 2003.
- [17] N. Paravastu, B. Hicks, P. Ray and W. Erickson, "A Candidate Active Antenna Design for a Low Frequency Radio Telescope Array," IEEE Conference, pp. 4493-4496, 2007.
- [18] J. P. Casey and R. Bansal, "Analysis and Optimization of an Electrically Small Receiving Antenna," IEEE Trans. Electromag. Comp., vol. 33, no. 3, pp. 197-204, Aug. 1991.
- [19] Jacob Z. Schanker, "Field Measurement and Verification of the Radiation Resistance of an 18.3 m Top-Loaded Monopole Antenna Operating at 190-535 kHz," IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 45, no. 4, Aug. 2003.
- [20] R. Strobbe, Antennas for 136 kHz, 2009.
- [21] H. A. Wheeler, "Fundamental Limitations of Small Antennas," Proceedings Of The I.R.E., pp. 1479-1484, Dec. 1947.
- [22] L. J. Chu, "Physical limitations on omni-directional antennas," J. Appl.Phys., vol. 19, pp. 1163-1175, 1948.
- [23] R. F. Harrington, "Effect of Antenna Size on Gain, Bandwidth, and Efficiency," Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 64D, No.1, June, 1959.



شکل (۱۱): مقاومت و راکتانس آنتن نهایی در شبیه‌سازی و پیاده‌سازی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج اندازه‌گیری آنتن لورن STL بهبود یافته با سیم‌های اضافه که پیاده‌سازی شده است، ارائه شده است. در ابتدا مقایسه‌ای روشن بین این آنتن و آنتن‌های قبلی انجام شده و مزیت آن نشان داده شده است. به عنوان مثال مقاومت تشعشعی آنتن حدوداً دو برابر شده و بهره تحقق یافته آن ۶dB افزایش یافته است. در ادامه تصاویر آنتن نهایی ساخته شده با ارتفاع ۱۰۰ متر ارائه شده است. الگوی تشعشعی زمینی این آنتن متقارن است و فقط اثرات اشیاء فیزیکی مثل کوه‌ها و ساختمان‌ها در آن مشاهده می‌شود. در نهایت امیدانس آنتن با استفاده از تحلیل‌گر شبکه Rohde-Schwarz اندازه‌گیری شده و نتایج به دست آمده محاسبات و شبیه‌سازی‌ها را تایید می‌کند.

۵- مراجع

- [1] B. Smalley, "Earth Science Applications of Space Based Geodesy," DES-7355 Tu-Th 9: 40-11: 05 Prefer-Seminar Room in 3892 Central Ave.
- [2] J.A., Pierce, John Alvin, A. A. McKenzie, and Richard Horace Woodward, eds. LORAN, long range navigation. Vol. 4. McGraw-Hill Book Co., 1948.
- [3] W. J. ECKER, "Specification of the Transmitted Loran-C Signal," Commandant United States Coast Guard, 1994.
- [4] J. S. Belrose, "Fessenden and Marconi: Their Differing Technologies and Transatlantic Experiments during the First Decade of This Century," IEE Conference Publication, pp. 32-43, spt. 1995.
- [5] G. L. Roth, P. Schick, J. Jacoby, C. Schweitzer, D. Gervasi, and Eric Wiley, "Enhanced or eLoran for Time and Frequency Applications," IEEE conference, pp.816-823, 2005.
- [6] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design. New York: John Wiley & Sons, 1982, 1997, 2005.
- [7] H. Jasik, Antenna Engineering Handbook. New York: McGraw Hill, 1960.

- [24] Fartookzadeh, M., S. H. Mohseni Armaki, S. M. J. Razavi, and J. Rashed-Mohassel. "Introduction of low frequency (LF) antennas and their classifications" *Journal of satellite technology*, vol. 2, no. 2, 2013, [in Persian].
- [25] Fartookzadeh, M., S. H. Mohseni Armaki, S. M. J. Razavi, and J. Rashed-Mohassel. "Coupling Effects and Performance of Loran Transmitter Antennas." *Journal of Communication Engineering (JCE)*, in press.
- [26] Fartookzadeh, M., S. H. Mohseni Armaki, S. M. J. Razavi, and J. Rashed-Mohassel. "Fast method for the calculation of radiation resistance of a catenary element antenna applied to the optimization of a Loran transmitter antenna and a scaled model fabrication." *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 28, no. 9 (2014): 1044-1055.
- [27] Fartookzadeh, M., S. H. Mohseni Armaki, S. M. J. Razavi, and J. Rashed-Mohassel. "Modification of square top loaded low-frequency antennas with investigations on catenary networks analysis." *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 29, no. 1 (2015): 92-103.
- [28] Irvine, H. M. *Cable structures*. Dover Publications, New York, 1992.
- [29] O'Brien, W.T., General solution of suspended cable problems. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 1967;93;ST1:1-26.
- [30] M. Fartookzadeh, S. H. Mohseni Armaki, S. M. J. Razavi, and J. Rashed-Mohassel, "Optimum Functions for Radial Wires of Monopole Antennas with Arbitrary Elevation Angles," *RADIOENGINEERING*, vol. 25, no. 1, pp. 53-60, Apr. 2016.

Design and Fabrication of Square Top-Loaded Monopole Antenna as the Loran Transmitter with Four Masts

**M. Fartookzadeh^{*}, S. H. Mohseni Armaki, S. M. J. Razavi, E. Yavari,
J. Rashed-Mohassel**

Department of Electrical and Electronics Engineering, Malek Ashtar University of Technology

(Received: 18/04/2016, Accepted: 12/06/2016)

Abstract

In this paper design method and measurement results of the antennas with square-toploadings (STL) as the modified versions of sectionalized Loran transmitter (SLT) antennas are presented. An advantage of the proposed antenna is the improved reactance using additional toploaded wires. Comparison between the proposed antenna and previous structures indicates that the radiation resistance is multiplied by two and the realized gain is improved 6 dB. The final structure with 100 m height is fabricated and its photographs are indicated. The radiation pattern of the realized antenna is obtained by turning around the antenna and recording the power amplitude. The position of each point is obtained using GPS and the distance differences are compensated for the radiation pattern. Therefore a symmetrical pattern is obtained and only the effects of natural objects like mountains or large buildings are observed in the radiation pattern. Finally, the antenna impedance is measured using vector network analyzer and the predicted results are validated successfully.

Keywords: Monopole antennas, Small antennas, Wire antennas, Loran system

^{*} Corresponding author E-mail: Mahdi.fartookzadeh@gmail.com