روش ساده برای طراحی آنتنهای شیپور شاخی[1]

چنگیز قبادی استادیار گروه مهندسی برق، دانشکدة فنی، دانشگاه ارومیه
محسن وکیل پور دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات، دانشگاه ارومیه
نصرت ناصری دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات، دانشگاه ارومیه

چکیده

در این مقاله آنتنهای شیپور شاخی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و یک روش ساده بر مبنای تقریب نور هندسی برای طراحی آنها ارائه می‌شود. در این روش با مشخص بودن زوایای نیم توان پرتو تشعشعی، ابعاد هندسی آنتن و فاصله کانونی منعکس کننده آن محاسبه می‌شوند. محاسبه زوایای نیمتوان آنتن طراحی شده با یک روش کامپیوتری نشان می‌دهد که نتایج بهمقادیر موردنظر بهطور قابل قبولی نزدیک است. همچنین مقایسه نتایج پرتو تشعشعی یک نمونه عملی با مقادیر موردنظر در طراحی اختلاف بسیار اندکی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: آنتن شیپور شاخی، تقریب نور هندسی

A Simple Method for Designing Hog Horn Antenna

Ch. Ghobadi Faculty of Eng., Urmia University
M. Vakilpoor Faculty of Eng., Urmia University
N. Naseri Faculty of Eng., Urmia University

Abstract

A simple method is developed to design the hog horn antennas. The method is based on geometrical optics and ray tracing technique. A computer program is also developed to compute the antenna dimensions such as aperture lengths and focal point of its parabolic reflectors. This program is also able to analyze the radiation pattern and the directivity of the antenna. It is shown that there is a good similarity between the simulation and experimental results at 9 Ghz with 15^o and 2^o half power beam widths in the H and E planes respectively. The designed hog horn antennas are potentially easy and cheaper, and have several advantages over the typical pyramidal horn and combined horn antennas.

Key words: Hog Horn Antenna, Geometrical Optics

1- Hog horn

۱- مقدمه

از آنجایی که درخواست برای آنتنهایی توانمندتر در فرکانسهای بالا افزایش یافته است، کاربرد آنتنهای روزنهای [۱] بیش از گذشته آشکار شده است. یکی از کاربردهای مهم آنتنهای روزنهای در صنایع هوایی است که سرعت زیاد و مسائل آیرودینامیکی مربوط به آن، امکان استفاده از آنتنهای معمولی را منتفی می‌سازد. در این موارد آنتنهای روزنهای روی بدنه نصب شده و روزنه آن با مواد دی الکتریک پوشانده می‌شود [1]. آنتنهای شیپور شاخی نوعی کارآمد از آنتنهای روزنهای هستند که کاربرد فراوانی در فرکانسهای مایکروویو دارند. این آنتنها دارای بهره بالا، VSER کم، پهنای پرتو زیاد و وزن کم بوده و ساخت آنها نسبتاً ساده است. تراز نسبی گلبرگ پشتی و کناری آنها نیز پایین می‌باشد. بنابراین در کاربردهای نوفه پایین [۲] و جاهایی که لازم است تعدادی آنتن در کنار هم قرار بگیرند عملکرد مناسبی دارند [2]. این آنتنها بعنوان آنتن تغذیه در آنتنهای منعکس کننده سهموی نیز بهکار می‌روند. بعنوان مثال در سیستمهای رادار، برای هدایت و ردیابی در ناوها، بهصورت گستردهای مورد استفاده قرار می‌گیرند [3]. متداولترین آنتنهای شیپوری، آنتن شیپور قطاعی [۳] صفحههای E و H و شیپور هرمی [۴] است. در این نوع شیپورها امواجی که از موجبر بهدهانه می‌رسند، در صفحهای که دهانه باز شده است به گونهای توزیع فاز می‌شوند که راندمان روزنه آنتن را حدود ۵۰% کاهش می‌دهند [2]. هرگاه نیاز بهطراحی یک آنتن شیپوری باشد که زوایای نیم توان HP_E و HP_H پرتو اصلی آن به نسبت زیادی (مثلاً ۱:۱۵) با هم تفاوت داشته باشند طراحی و ساخت آنتن شیپور هرمی بهصورت بهینه ناممکن می‌شود. در چنین مواردی ممکن است از آنتن شیپور مرکب [۵] استفاده شود که باز کردن دهانه آن در دو صفحه E و H مستقل ازهم صورت می‌گیرد. ولی شیپور مرکب نیز معایبی دارد از جمله اینکه مراکز فاز در دو صفحه E و H از یکدیگر فاصله قابل توجهی پیدا می‌کنند. همچنین بهدلیل ناپیوستگی‌های سطحی زیادی که در ساختمان آن وجود دارد مشکلات تطبیق امپدانسی پیش می‌آید و نیز راندمان روزنه آن

1-Aperture antenna
2-Low noise
3-Sectoral horn antenna
4-Pyramidal horn
5-Compound horn antenna

مانند آنتن شیپور هرمی بهدلیل اختلاف فازهای موجود در روزنه پایین است.

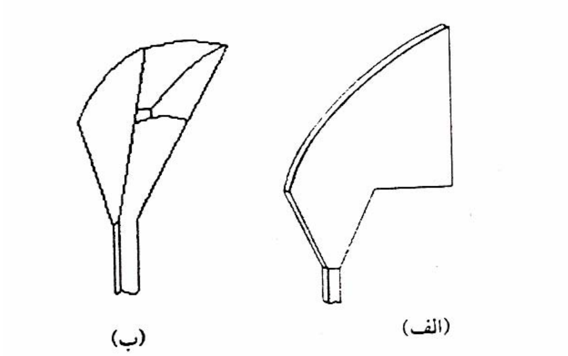
نوع دیگری از آنتنهای شیپوری که مشکلات آنتنهای مذکور را ندارد آنتن شیپور شاخی است. که در آن می‌توان در یک یا هر دو صفحه E و H دهانه آنتن را طوری باز کرد که اولاً توزیع فاز در یک یا هر دو صفحه دهانه آنتن یکسان شود تا راندمان روزنه افزایش یابد، ثانیاً باز کردن دهانه در هر دو صفحه مستقل از هم صورت گیرد. بنابراین در حالتی که زوایای نیم توان پرتو اصلی آنتن در صفحات E و H بهنسبت زیادی با هم فرق داشته باشند، از نظر طراحی و ساخت آنتن مشکلی پیش نمی‌آید. در این مقاله ابتدا آنتنهای شیپور شاخی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و سپس یک روش ساده برای طراحی آنها ارائه می‌گردد.

۲- آنتنهای شیپور شاخی

با ترکیب یک آنتن شیپور قطاعی یا شیپور هرمی با یک منعکس کننده سهموی بهنحوی که در شکل (۱) نشان داده شده است یک آنتن شیپور شاخی بهدست می‌آید. در این ترکیب منعکس کننده سهموی با سیستم تغذیه جابجا شده [۶] بهوسیله آنتن شیپوری تغذیه می‌شود و مرکز فاز آنتن شیپوری در محل کانون منعکس کننده سهموی قرار می‌گیرد. بهاین ترتیب در این سیستم، تغذیه در مسیر امواج منعکس شده از سطح منعکس کننده قرار ندارد. بهعبارت دیگر تغذیه آنتن انسدادی در مقابل منعکس کننده سهموی بهوجود نمی‌آورد. از طرف دیگر بهدلیل خاصیت منعکس کننده سهموی، امواجی که بهروزنه آنتن شیپور شاخی می‌رسند هم فاز می‌شوند. بنابراین راندمان روزنه افزایش می‌یابد. در آنتن شیپور شاخی هرگاه روزنه آنتن نسبت بهموجبر در یک جهت باز شود بهآن شیپور شاخی قطاعی می‌گویند. این شیپور شاخی ترکیبی از یک آنتن شیپور قطاعی و یک منعکس کننده سهموی استوانهای است. واضح است که در ترکیب اخیر عمل موازی و هم فاز شدن امواج درهر دو صفحه انجام می‌شود با این تفاوت که طول روزنة آنتن تنها در صفحهای که دهانه شیپور قطاعی باز شده افزایش می‌یابد. در شکل (۱- الف) یک آنتن شیپور قطاعی که در صفحه H باز شده و شامل یک منعکس کننده سهمی استوانهای است، نشان داده شده است.

6- Offset feed

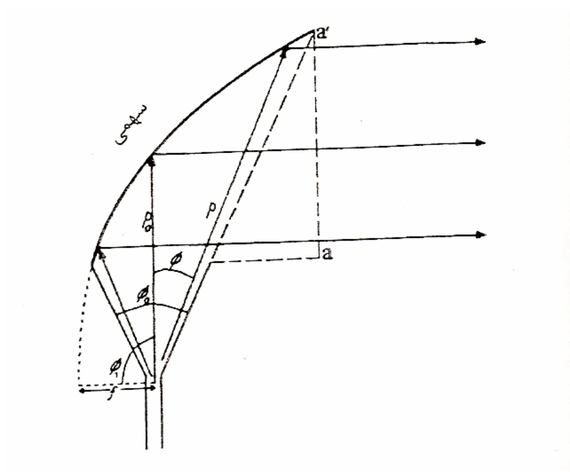
هرگاه با استفاده از آنتن شیپور هرمی و یک منعکس کننده سهموی روزنه آنتن در هر دو جهت باز شود آنتن شیپور شاخی کامل بهدست می‌آید که شکل (۱-ب) نمونهای از آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱- آنتن شیپور شاخی
الف – شیپور شاخی قطاعی ب- شیپور شاخی کامل

۳- روش طراحی

شکل (۲) مقطع یک آنتن شیپور شاخی قطاعی را که دهانه آن در صفحه H باز شده است، نشان می‌دهد.

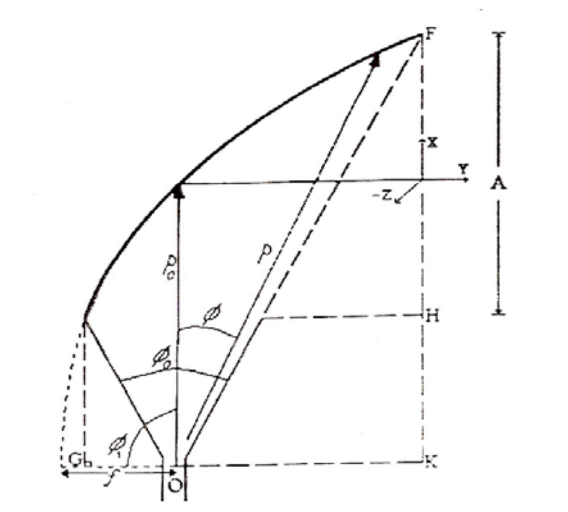


شکل ۲- مختصات هندسی سطح مقطع شیپور شاخی در صفحه H

توزیع میدان روی روزنه، در صفحه H در مد TE_{10} با استفاده از تقریب نور هندسی بهصورت زیر است [4].

$$E = E_0 \frac{\rho_0}{\rho} \cos \frac{\pi\phi}{\phi_0} \qquad (۱)$$

$\frac{\rho_0}{\rho}$ مربوط بهضریب پراکندگی و ϕ_0 زاویهٔ دهانهٔ شیپور قطاعی داخل آنتن و ϕ زاویهٔ یک اشعه دلخواه، نسبت به محور شیپور یعنی ρ_0 است. بهدلیل خاصیت منعکس کننده سهموی، امواج تا دهانه آنتن، یعنی aa' طول مسیرهای یکسانی را طی می‌کنند و در نتیجه در توزیع میدان روی روزنه اختلاف فازی ظاهر نمی‌شود. با توجه بهشکل (۳) و با استفاده از روابط حاکم بر سهمی‌ها روابط هندسی زیر را می‌توان نوشت.



شکل ۳- تصویر سطح مقطع آنتن شیپور شاخی در صفحهٔ H

$$\rho_0 = \frac{2f}{1+\cos(\phi_1)} \qquad (۲)$$

$$\rho = \frac{2f}{1+\cos(\phi_1+\phi)} \qquad (۳)$$

که f فاصله کانونی سهمی می‌باشد. با تقسیم دو رابطهٔ فوق بهیکدیگر ضریب پراکندگی به‌دست می‌آید.

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{1+\cos(\phi_1+\phi)}{1+\cos(\phi_1)} \qquad (۴)$$

با توجه به رابطهٔ (۱) در حالت کلی توزیع میدان روی روزنه از نظر دامنهٔ کمی نامتقارن می‌شود. اگر در صفحه E دهانه باز نشده باشد میدان در آن صفحه در دهانه آنتن یکنواخت و هم فاز خواهد شد و اگر دهانه در این صفحه باز شده باشد، توزیع میدان مانند توزیع میدان صفحه E شیپور قطاعی صفحه E می‌شود.

برای طراحی منعکس کننده سهموی باید فاصله کانونی آن محاسبه شود. با توجه بهشکل (۳) می‌توان نوشت:

$$OF = \frac{2f}{1+\cos(\phi_1+\phi_0/2)} \quad (۵)$$

$$FK = OF\sin(\phi_1+\phi_0/2) \quad (۶)$$

بنابراین:

$$FK = \frac{2f\sin(\phi_1+\phi_0/2)}{1+\cos(\phi_1+\phi_0/2)} \quad (۷)$$

و همچنین

$$OE = \frac{2f}{1+\cos(\phi_1-\phi_0/2)} \quad (۸)$$

$$FK = A + OE\sin(\phi_1-\phi_0/2) \quad (۹)$$

پس:

$$Fk = A + \frac{2f\sin(\phi_1-\phi_0/2)}{1+\cos(\phi_1-\phi_0/2)} \quad (۱۰)$$

با ترکیب روابط (۷) و (۱۰) می‌توان نوشت:

$$f = A/[2(\frac{\sin(\phi_1+\phi_0/2)}{1+\cos(\phi_1+\phi_0/2)} - \frac{\sin(\phi_1-\phi_0/2)}{1+\cos(\phi_1-\phi_0/2)})] \quad (۱۱)$$

بنابراین با دانستن طول A و زوایای ϕ_1 و ϕ_0، فاصلهٔ کانونی منعکس کننده سهموی از رابطهٔ فوق مشخص می‌شود. این رابطه مربوط بهفاصله کانونی منعکس کننده سهموی استوانهای شیپور شاخی قطاعی است که در صفحه H باز شده است. حال اگر این شیپور در صفحه E باز شود فاصله کانونی از رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد:

$$f' = B/[2(\frac{\sin(\theta_1+\theta_0/2)}{1+\cos(\theta_1+\theta_0/2)} - \frac{\sin(\theta_1-\theta_0/2)}{1+\cos(\theta_1-\theta_0/2)})] \quad (۱۲)$$

که θ_0 و θ_1 مقادیر متناظر ϕ_0 و ϕ_1 در صفحه E می‌باشند. در صورتی که گسترش دهانه روزنه در هر دو صفحه E و H انجام شود و برای آنکه مراکز فاز دو صفحه E و H برابر شوند باید فاصله کانونی سهمی‌های مربوط به دو صفحه E و H برابر باشند. بنابراین باید رابطهٔ زیر توسط پارامترهای آنتن شیپوری ارضاء شود:

$$\frac{A}{B} = \frac{\frac{\sin(\phi_1+\phi_0/2)}{1+\cos(\phi_1+\phi_0/2)} - \frac{\sin(\phi_1-\phi_0/2)}{1+\cos(\phi_1-\phi_0/2)}}{\frac{\sin(\theta_1+\theta_0/2)}{1+\cos(\theta_1+\theta_0/2)} - \frac{\sin(\theta_1-\theta_0/2)}{1+\cos(\theta_1-\theta_0/2)}} \quad (۱۳)$$

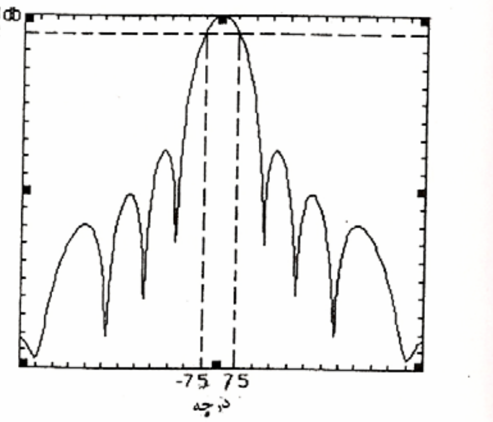
ϕ_0 و ϕ_1 و همچنین θ_0 و θ_1 را می‌توان بهدلخواه انتخاب نمود اما باید در نظر داشت که با توجه به روابط (۱۱) و (۱۲) در صورتی که ϕ_0 و یا θ_0 کوچک باشد ابعاد آنتن بزرگ می‌شود و اگر مقدار آنها بزرگ باشد با توجه به رابطه (۴) تغییرات ضریب پراکندگی زیاد می‌شود. بعلاوه عدم دقت در انتخاب می‌تواند باعث مشکل عدم تطبیق امپدانس و افزایش SWR شود.

بهعنوان نمونه، برای طراحی یک آنتن شیپور شاخی قطاعی که دهانه آن در صفحه H باز شده باشد و HP_H موردنظر آن 15° باشد می‌توان $\phi_0 = 50^\circ$ و $\phi_1 = 80^\circ$ انتخاب نمود که انتخاب مناسبی است. بهروشی مشابه آنچه که در مرجع [2] برای اثبات رابطه تعیین زاویه نیم توان آنتن شیپوری آمده است،

می‌توان اثبات نمود که برای توزیع میدانی که در رابطه (۱) بیان شده است زاویه نیم توان آنتن شیپور شاخی قطاعی صفحهٔ H، از رابطهٔ (۱۴) قابل محاسبه است. صحت این رابطه در چندین حالت مختلف به روش عددی مورد تأیید قرار گرفت.

$$HP_H = 68.2\frac{\lambda}{A} \qquad (۱۴)$$

با داشتن HP_H می‌توان A را از رابطهٔ (۱۴) بهدست آورد. برای نمونه مورد طراحی فوق $A = 4.547\lambda$ می‌شود و از رابطهٔ (۱۱) فاصله کانونی منعکس کننده سهموی برابر 2.905λ محاسبه می‌گردد. در شکل (۴) پرتو تشعشعی آنتن مورد مثال با استفاده از روش تقریب بهصورت آنتنهای رشتهای [1] رسم شده است.



شکل ۴- پرتو تشعشعی آنتن شیپور شاخی با $\phi_0 = 50^\circ$ و $\phi_1 = 80^\circ$ و $HP_H = 15^\circ$ در صفحهٔ XZ

نحوهٔ بهدست آوردن پرتو تشعشعی با استفاده از این روش در ضمیمه توضیح داده شده است. از روی شکل (۴) مقدار HP_H برابر 15° محاسبه می‌شود که منطبق بر اهداف طراحی می‌باشد. همچنین یک نمونه آزمایشگاهی در فرکانس 9 GHz با مقادیر محاسبه شده فوق ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت که HP_H این نمونه آزمایشگاهی حدوداً 15° اندازهگیری شد.

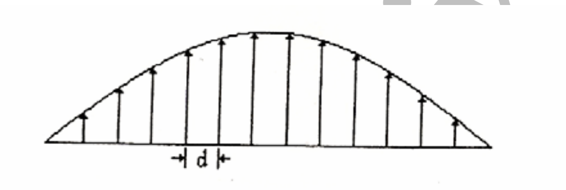
۴- خلاصه روش

برای طراحی یک آنتن شیپور شاخی در مرحله اول با توجه بهفرکانس کار، A از رابطهٔ (۱۴) محاسبه می‌شود. سپس با توجه بهابعاد موردنظر، ϕ_0 و ϕ_1 با یک انتخاب مناسب تعیین می‌گردند و سرانجام فاصله کانونی سهمی باز تابنده از رابطهٔ (۱۱) بهدست می‌آید. در صورتی که گسترش روزنه آنتن در هر دو صفحه مورد نظر باشد باید رابطهٔ (۱۳) نیز در انتخاب ϕ_0 و ϕ_1 و همچنین θ_0 و θ_1 مدنظر قرار گیرد.

۵- ضمیمه

محاسبه پرتو تشعشعی آنتنهای روزنهای با استفاده از روش تقریب با آنتنهای رشتهای

در این روش از تئوری آنتنهای رشتهای برای محاسبه میدانهای تشعشعی استفاده می‌شود. نحوهٔ عمل بدین ترتیب است که ابتدا توزیع میدان روی روزنه آنتن در صفحات E و H بهطور جداگانه تعیین می‌شود. برای مثال توزیع میدان در صفحات E و H دهانه یک موجبر انتها باز با مد TE_{10} بهترتیب یکنواخت و سینوسی است؛ شکل (۵).



شکل ۵- تقریب توزیع میدان دهانهٔ موجبر با آنتن رشتهای متساوی الفاصله

در مرحله بعد فرض می‌شود توزیع موردنظر از تعداد زیادی المان آنتن رشتهای متساوی‌الفاصله که بهصورت همه جهته[2] تشعشع می‌کنند تشکیل یافته باشد. در این حالت برای کاهش تقریب، فاصله المانها خیلی کوچکتر از طول موج اختیار می‌شود و توزیع جریان المانها نیز نظیر توزیع میدان مزبور در نظر گرفته می‌شود. پرتو تشعشعی یک آنتن رشتهای خطی از حاصلضرب

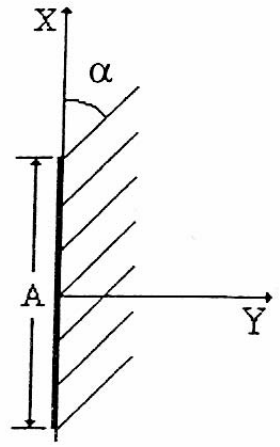
1-Array antenna

2- Isotropic

فاکتور رشته(۳) و پرتو تشعشعی هر المان بهدست میآید [2]. در اینجا چون المانها بهصورت همه جهته تشعشع میکنند تأثیری در ضرب فوق نخواهند داشت و پرتو کل آنتن همان فاکتور رشته خواهد بود. اگر فرض شود که آنتن رشتهای نظیر شکل (۶) روی محور x قرار گرفته باشد، در این صورت فاکتور رشته از رابطهٔ زیر محاسبه میشود:

$$AF = \sum_{n=0}^{M-1} E_n e^{j\beta nd \sin\alpha} \qquad (۱۶)$$

در رابطهٔ فوق E_n دامنه میدان در محل المان nام، d فاصله المانها از یکدیگر، β ثابت انتشار و M تعداد المانهای آنتن رشتهای مزبور است. بدیهی است هر چه M بزرگتر باشد (d کوچکتر)، دقت روش افزایش مییابد.



شکل ۶- استفاده از تئوری آنتنهای رشتهای

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش ساده مبتنی بر اصول تقریب نور هندسی ارائه شد که در آن بر اساس زوایای نیم توان پرتو تشعشعی موردنظر، ابعاد آنتن و فاصله کانونی منعکس کننده سهموی محاسبه میشوند. نتایج شبیهسازی کامپیوتری و پرتو تشعشعی یک نمونه عملی نشان میدهند که اختلاف بسیار اندکی بین زوایای نیم توان بهدست آمده با مقادیر موردنظر طراحی وجود دارد.

مراجع

[1] Balanis, C. A. "Antenna Theory Analysis and Design", Second edition, John wiley & sons, Inc, 1997.

[2] Stutzman, W.L. and Thiele, G. A. "Antenna Theory and Design", New york, Wiley, 1981.

[3] Preston E. Law JR. "Shipboard Antennas, Ar.tech House", Inc, 1986.

[4] Love, A. W. "Electromagnetic Horn Antenna, New York", The institutue of electrical and electrionic engineers, Inc, 1978.

3-Array factor