Archive of SID

محاسبه پارامترهای طراحی شبکه‌های مخابراتی سلولی زیر دریا

محمد شیخ زفره[۱]، پژمان خدیوی[۲]
۱- دانشگاه صنعتی اصفهان sheikhzefreh@ec.iut,ac.ir
۲- دانشگاه صنعتی اصفهان pkhadivi@ec.iut.ac.ir

چکیده

از جمله کاربردهای شبکه‌های زیر آبی می‌توان به مواردی همچون جمع‌آوری داده‌های اقیانوس‌شناسی، کنترل آلودگی دریایی، تحقیقات دریایی، جلوگیری از بلایا و آسیب‌های طبیعی مانند سونامی، کمک به دریانوردی و ... اشاره نمود. شبکه‌های زیرآبی باید بتوانند داده‌های جمع‌آوری شده را از طریق یک ایستگاه پایه در زیر دریا به کاربران دیگر و یا یک ایستگاه ساحلی برسانند. از آنجا که پهنای باند در کانال‌های صوتی زیر آب بسیار محدود است، استفاده مجدد فرکانسی و در نتیجه بهره‌گیری از مفهوم شبکه‌های سلولی در این کانال‌ها بسیار با اهمیت خواهد بود. در این مقاله پس از بدست آوردن نسبت سیگنال به تداخل برای کانال‌های صوتی زیرآب، محدوده مجاز برای انتخاب شعاع سلول تعیین شده است. از نتایج قابل توجه این است که برای برآورده کردن شرایط سیگنال به تداخل و پهنای باند مورد نظر برای کاربران موجود در سلول، ممکن است به‌ازای پارامترهای خاصی، مانند چگالی کاربران در سلول، محدوده مجازی برای انتخاب شعاع سلول و در نتیجه انجام طراحی مورد نظر وجود نداشته باشد. در ادامه، تعداد کاربران قابل پشتیبانی در واحد فرکانس، پهنای باند به‌ازای هر کاربر و ظرفیت کاربر نیز برای شبکه‌های سلولی زیر دریا تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی

انتشار صوتی، شبکه‌های سلولی زیر دریا، استفاده مجدد فرکانسی

۱– مقدمه

مخابرات زیردریا بعد از جنگ جهانی دوم و در سال ۱۹۴۵ که تلفن زیرآبی برای مخابره با زیردریایی‌ها طراحی شد، مورد توجه قرار گرفت. در شبکه‌های مخابراتی زیردریا، مخابره صوتی تکنولوژی متداول لایه فیزیکی است. در حقیقت برای پرهیز از تلفات سریع امواج الکترومغناطیس، لازم است این امواج در فرکانس‌های پائین (۳۰-۳۰۰Hz) منتشر می‌شوند که نیازمند آنتن‌های بزرگ و توان ارسالی زیاد می‌باشند[۱]. امواج نوری در مقایسه با امواج رادیوئی از تضعیف کمتری برخوردارند اما پدیده پراش در آن تأثیرگذار است. علاوه بر این، انتقال سیگنال‌های نوری نیازمند جهت‌دهی دقیق پرتو نازک لیزر است. بنابراین، لینک‌ها در شبکه‌های زیرآبی بر اساس مخابرات بی‌سیم صوتی می‌باشند[۵-۱]. چالش‌های اساسی در طراحی شبکه‌های صوتی زیرآبی عبارتند از:

پهنای باند کانال صوتی زیر آبی به شدت محدود است و به فرکانس و گستره ارسال وابسته است. طبق[۵] تقریباً هیچ سیستم تجاری یا تحقیقاتی نمی‌تواند حاصلضرب

(گستره ارسال) ×(نرخ ارسال) را از $40\ km\times kb/s$ بیشتر کند.

کانال‌های زیرآبی شدیداً آسیب‌پذیر هستند که علت‌های اساسی آن محوشدگی و چندگانگی مسیر می‌باشد.

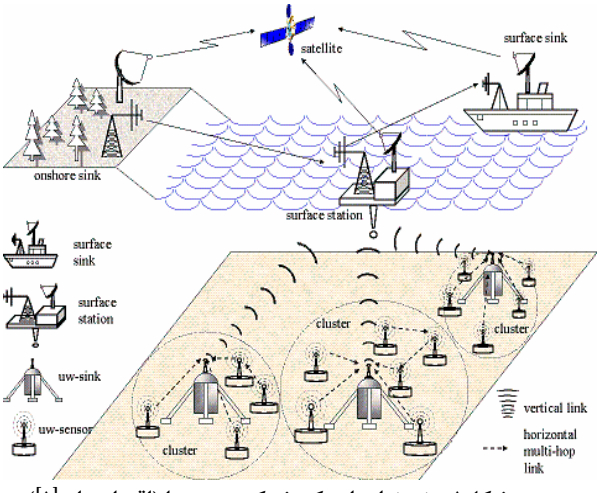
سرعت انتشار سیگنال در یک کانال صوتی زیر آبی حدود $1.5\times10^3\ m/s$ است. بنابراین تأخیر انتشار در زیر آب از لحاظ مرتبه، پنج برابر کانال‌های RF زمینی بوده و علاوه بر این، به میزان قابل توجهی متغیر می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

به علت شرایط ویژه کانال‌های زیرآبی، نرخ خطای بیت زیاد است.

شبکه‌های زیر آبی کاربردهای زیادی دارند که از جمله آنها می‌توان به مواردی همچون جمع‌آوری داده‌های اقیانوس-شناسی، کنترل آلودگی دریایی، تحقیقات ساحلی، جلوگیری از بلایا و آسیب‌های طبیعی مانند سونامی، کمک به دریانوردی و ... اشاره نمود. همچنین تجهیزات زیرآبی که به حسگرهایی مجهز شده‌اند قادر خواهند بود تا اطلاعات



شکل۱- نمونه‌ای از یک شبکه زیر دریا (اقتباس از [۱])

علمی‌مورد نیاز خود را از زیر آب جمع‌آوری کنند. به منظور این‌که این اهداف محقق شود لازم است تا امکان مخابره بین‌شناسی، کنترل آلودگی دریایی، تحقیقات ساحلی، جلوگیری از بلایا و آسیب‌های طبیعی مانند سونامی، کمک به دریانوردی و ... اشاره نمود. همچنین تجهیزات زیرآبی که به حسگرهایی مجهز شده‌اند قادر خواهند بود تا اطلاعات علمی‌مورد نیاز خود را از زیر آب جمع‌آوری کنند. به منظور اینکه این اهداف محقق شود لازم است تا امکان مخابره بین تجهیزات زیرآبی فراهم گردد. شبکه‌های زیرآبی باید بتوانند اطلاعات حرکت، موقعیت و پیکربندی را با یکدیگر مبادله کنند و همچنین بتوانند داده‌های جمع‌آوری شده را از طریق یک ایستگاه پایه در زیر دریا به کاربران دیگر و یا یک ایستگاه ساحلی برسانند. نمونه ای از یک شبکه زیر آبی در شکل) نشان داده شده است.

آرایه شبکه‌های سلولی با معرفی مفهوم استفاده مجدد فرکانسی، منجر به ایجاد تحولاتی بزرگ در مخابرات سیار گردید. ایده استفاده از یک فرکانس در دو سلولی که به اندازه کافی از یکدیگر فاصله دارند به نحوی که باعث ایجاد تداخل در عملکرد یکدیگر نگردند، باعث می‌شود تا از پهنای باند موجود مجدداً استفاده گردد و علاوه بر آن، در یک محدوده وسیع جغرافیایی از این پهنای باند بهره برد. از آنجا که پهنای باند در کانال‌های صوتی زیر آب بسیار محدود است، استفاده مجدد فرکانسی در این کانال‌ها بسیار با اهمیت خواهد بود. در اینجا این سوال مطرح می‌شود که چگونه می‌توان مفهوم شبکه‌های سلولی زمینی را به شبکه‌های صوتی زیر آب تعمیم داد؟

اولین کار در طراحی یک شبکه سلولی انتخاب توپولوژی شبکه به معنای تعیین اندازه (شعاع) سلول می‌باشد. به عبارت دیگر به ازای یک توزیع خاص از کاربران، میزان پوشش یک ایستگاه پایه زیر دریا چقدر باید باشد؟ همچنین، ایستگاه پایه دیگری که در همان فرکانس کار می‌کند در چه فاصله‌ای باید قرار گیرد؟

هر چند در شبکه‌های سلولی زمینی جواب‌های روشنی برای این سوالات وجود دارد اما در شبکه‌های سلولی زیر دریا تلفات مسیر نه تنها به مسیر طی شده توسط سیگنال بستگی دارد، بلکه به میزان جذب صوت به عنوان تابعی از فرکانس نیز وابسته است و بنابراین پاسخ دادن به این سوال دشوار خواهد گشت.

در این مقاله پس از بدست آوردن نسبت سیگنال به تداخل برای کانال‌های مخابراتی زیر آب، مقادیر دقیقتری از پارامترهای طراحی برای شبکه‌های سلولی زیر دریا بدست خواهیم آورد.

۲- کارهای انجام شده

عمده کارهای انجام شده در زمینه شبکه‌های مخابراتی زیر دریا مرتبط با شبکه‌های حسگر زیر آب می‌باشد[۵-۱]. با این حال Stojanovic در [۷] و [۸] به بحث شبکه‌های سلولی زیر آب پرداخته و ضمن برشمردن چالش‌های پیش رو در طراحی این شبکه‌ها، به محاسبه برخی پارامترهای طراحی شبکه‌های سلولی زیر آب پرداخته است.

هر چند کار ایشان به عنوان اولین قدم در طراحی شبکه‌های سلولی زیرآب ارزشمند می‌باشد، با این حال سنگ بنای بحث بر مبنای یک تخمین نه چندان دقیق از مدل تضعیف و انتشار صوت بنا نهاده شده که متعاقباً نتایج نادقیقی را در پی خواهد داشت. در این مقاله پس از بدست آوردن نسبت سیگنال به تداخل برای کانال‌های صوتی زیرآب به روش دقیق‌تر، محدوده مجاز برای انتخاب شعاع سلول تعیین شده است.

از نتایج قابل توجه این است که برای برآورده کردن شرایط سیگنال به تداخل و پهنای باند مورد نظر برای کاربران موجود در سلول، ممکن است به ازای پارامترهای خاصی مانند چگالی کاربران در سلول، محدوده مجازی برای انتخاب شعاع سلول و در نتیجه انجام طراحی مورد نظر وجود نداشته باشد. در ادامه تعداد کاربران قابل

www.SID.ir

Archive of SID

پشتیبانی در واحد فرکانس و پهنای باند به‌ازای هر کاربر و ظرفیت کاربر نیز برای شبکه‌های سلولی زیر دریا تعیین شده است.

۲–۱– محاسبه پارامترهای طراحی شبکه‌های سلولی زیر دریا

در این بخش، با در نظر گرفتن چهارچوب کلی شبکه‌های سلولی زمینی، سعی می‌کنیم با درنظر گرفتن محدودیت‌های مخابرات صوتی زیر آب، پارامترهای لازم برای طراحی شبکه‌های سلولی زیر دریا را به دست آوریم. به‌طور خاص، سعی بر آن است تا در طراحی مورد نظر معیارهای زیر را در نظر بگیریم:

نسبت سیگنال به تداخل از حد آستانه‌ای بالاتر باشد، $SIR \geq SIR_0$.

پهنای باند به‌ازای هر کاربر از یک حد از پیش تعیین شده بیشتر باشد، $W \geq W_0$.

۲–۲– انتشار صوت در زیر آب

در کانال‌های صوتی زیرآب، تضعیف یا تلفات مسیر سیگنالی در فاصله r از فرستنده و در فرکانس f از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$A(r,f) = r^k a(f)^r \qquad (۱)$$

که در آن k فاکتور گسترش و a(f) ضریب تضعیف می‌باشد. تلفات مسیر صوتی را می‌توان به‌صورت زیر نیز بیان کرد.

$$10\log A(r,f) = k.10\log r + r.10\log a(f) \qquad (۲)$$

اولین گزاره در مجموع فوق بیانگر تلفات گسترش و گزاره دوم تلفات جذب را نشان می‌دهد. فاکتور گسترش k هندسه انتشار را توصیف می‌کند. در گسترش کروی مقدار k برابر ۲ و در انتشار استوانه‌ای این مقدار برابر ۱ می‌باشد. k=1.5 را نیز برای حالت ترکیبی در نظر می‌گیرند. (پارامتر متناظر k در کانال‌های رادیویی نمای تلفات مسیر، α، است که مقداری بیش از ۲ دارد.) ضریب تضعیف، $a(f)$، را می‌توان با استفاده از فرمول Thorp برحسب dB/km به صورت زیر بیان کرد[۶]:

$$10\log a(f) = 0.11\frac{f^2}{1+f^2} + 44\frac{f^2}{4100+f} + 2.75.10^{-4} f^2 + 0.003 \qquad (۳)$$

که در آن f ، فرکانس بر حسب KHz است.

حال اگر چگالی طیف توان سیگنال ارسالی را با مقدار ثابت S_t نشان دهیم، توان دریافتی در فاصله r از فرستنده و به ازای بازه فرکانسی $(f_{\min}, f_{\min}+W)$ برابر خواهد بود با

$$P(r) = \int_{f_{\min}}^{f_{\min}+W} S_t A^{-1}(r,f)df = S_t \int_{f_{\min}}^{f_{\min}+W} r^{-k} a(f)^{-r} df$$

با جایگذاری a(f) از رابطه (۳) داریم:

$$= S_t.r^{-k}.\int_{f_{\min}}^{f_{\min}+W} \exp(-(0.011\frac{f^2}{1+f^2} + 4.4\frac{f^2}{4100+f} + 2.75.10^{-5} f^2 + 0.0003).r.\ln 10\, df$$

$$= S_t.r^{-k}.\int_{f_{\min}}^{f_{\min}+W} \exp(-(A\frac{f^2}{1+f^2} + B\frac{f^2}{4100+f} + Cf^2 + D))\, df$$

که در آن ضرایب A، B، C و D عبارتند از:

$$A = 0.011r\ln 10 \qquad B = 4.4r\ln 10$$
$$C = 2.75\times 10^{-5} r\ln 10 \qquad D = 3\times 10^{-4} r\ln 10$$

از آنجا که محاسبه این انتگرال بسیار دشوار است لذا از تخمین‌های زیر استفاده می‌کنیم:

$$\frac{f^2}{1+f^2} \approx 1 \qquad \frac{f^2}{4100+f} \approx \frac{f^2}{4100} \qquad (۴)$$

فرکانس کار در مخابرات صوتی زیر آبی در حد چند کیلو هرتز است و بنابراین این تخمین می‌تواند تخمین مناسبی باشد. لذا P(r) را می‌توان به‌صورت زیر بدست آورد.

$$P(r) = S_t.r^{-k}.\int_{f_{\min}}^{f_{\min}+W} \exp(-(A\frac{f^2}{1+f^2} + B\frac{f^2}{4100+f} + Cf^2 + D))\, df$$

$$\cong S_t.r^{-k}.\int_{f_{\min}}^{f_{\min}+W} \exp(-(A + B\frac{f^2}{4100} + Cf^2 + D))\, df$$

$$= S_t.r^{-k}.K.\int_{f_{\min}}^{f_{\min}+W} \exp(-Ef^2)\, df$$

که در آن

$$K = \exp(-(A+D)) \text{ و } E = \frac{B}{4100} + C .$$

حال با استفاده از تابع خطا erf(x) داریم

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x \exp(-\lambda^2)\, d\lambda \qquad (۵)$$

و در این صورت

$$P(r) = S_t.r^{-k}.K.\int_{f_{\min}}^{f_{\min}+W} \exp(-Ef^2)\, df$$

$$= S_t.r^{-k}.\frac{K}{\sqrt{E}}.\frac{\sqrt{\pi}}{2}\left[erf(f_{\min}+W) - erf(f_{\min})\right]$$

با جایگذاری E و K و تعریف متغیر γ به‌صورت زیر

www.SID.ir

Archive of SID

$$\gamma = 17.6\exp(-0.974r).r^{-(k+\frac{1}{2})}$$

توان دریافتی در فاصله r از فرستنده برابر خواهد بود با

$$P(r) = S_t.\gamma.e^{-0.974r}.r^{-(k+\frac{1}{2})} \qquad (۶)$$

حال با استفاده از P(r) و با فرض اینکه همه فرستنده‌ها با چگالی طیف توان مشابه S_t ارسال می‌کنند، در این صورت نسبت سیگنال به تداخل، SIR، را می‌توان به‌صورت زیر بدست آورد:

$$SIR = \frac{P(r)}{\sum_i I_i} = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\min}+W} S_t A^{-1}(r,f)df}{\sum_i \int_{f_{\min}}^{f_{\min}+W} S_t A^{-1}(X_i,f)df}$$

$$= \frac{S_t.\gamma.e^{-0.974r}.r^{-(k+\frac{1}{2})}}{\sum_i S_t.\gamma.e^{-0.974|X_i|}.|X_i|^{-(k+\frac{1}{2})}}$$

که در آن $\mathbf{X}_i$ فاصله کاربر متداخل تا گیرنده مورد نظر است.

بنابراین نسبت سیگنال به تداخل برای کانال‌های صوتی زیرآب برابر است با

$$SIR = \frac{e^{-0.974r}.r^{-(k+\frac{1}{2})}}{\sum_i e^{-0.974X_i}.|X_i|^{-(k+\frac{1}{2})}} \qquad (۷)$$

همان‌گونه که این رابطه نشان می دهد، با قبول تخمین (۴)، نسبت سیگنال به تداخل مستقل از فرکانس است و لذا این نسبت برای سلول‌های مختلف که از فرکانس‌های متفاوتی استفاده می‌کنند قابل استفاده است. در بخش‌های بعد از این رابطه برای بدست آوردن پارامترهای طراحی شبکه‌های سلولی زیرآب استفاده خواهیم کرد.

۲–۳– محاسبه شعاع سلول

پهنای باندی که به هر کاربر اختصاص می‌یابد، B_0، به روش دستیابی چندگانه مورد استفاده بستگی دارد. اگر از روش TDMA استفاده گردد، این مقدار برابر پهنای باندی است که به سلول تخصیص یافته است، $B_0 = B/N$، که در آن N شماره استفاده مجدد است (N از رابطه $N = i^2 + ij + j^2$ بدست می‌آید که i و j اعداد صحیح اند [۹].) و اگر از روش FDMA استفاده گردد این مقدار برای یکی از U کاربری که در سلول مشارکت دارد برابر $B_0 = (B/N)/U$ خواهد بود. در تحلیلی که در ادامه ارایه می‌شود، بدون از دست دادن کلیت، فرض می‌کنیم که از روش TDMA استفاده می‌شود.

برای محاسبه شعاع سلول ابتدا از SIRی که یک کاربر خاص از سلول‌های هم کانال می‌بیند آغاز می‌کنیم. با فرض اینکه سلول‌ها شش ضلعی هستند بدترین حالت هنگامی‌است که کاربر در لبه سلول قرار داشته باشد در این حالت مقدارتقریبی SIR را می‌توان به صورت زیر بیان کرد

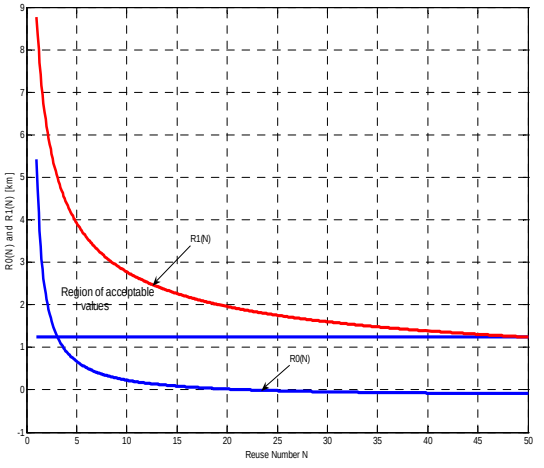
$$SIR \approx \frac{P(R)}{6P(D)} \qquad (۸)$$

که در آن R شعاع سلول و D فاصله مراکز دو سلول هم‌کانال می‌باشد. در یک سیستم دوبعدی رابطه بین R و D به‌صورت $D = QR$ است که در آن $Q = \sqrt{3N}$ و N شماره استفاده مجدد است[۹].

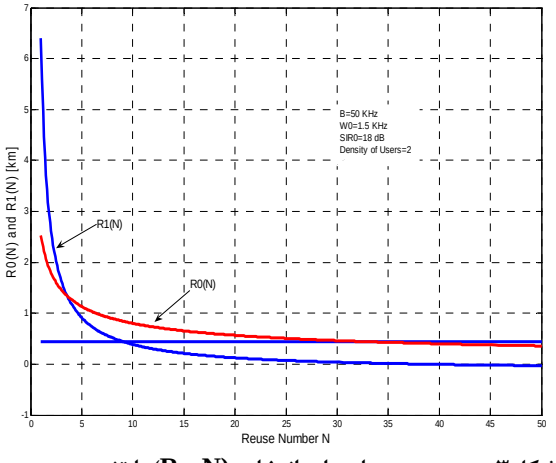
برای اینکه SIR از یک حداقل بزرگتر باشد، $SIR \geq SIR_0$، طبق نسبت سیگنال به تداخلی که قبلاً برای کانال‌های زیر آب بدست آمد، خواهیم داشت:

$$SIR \geq SIR_0$$

$$SIR \approx \frac{P(R)}{6P(D)} = \frac{e^{-0.974R}.R^{-(k+\frac{1}{2})}}{6e^{-0.974D}.D^{-(k+\frac{1}{2})}} \geq SIR_0$$



شکل۲- محدوده مجاز برای انتخاب (N و R)



شکل۳- محدوده مجاز برای انتخاب (N و R) با تغییر پارامترهای طراحی

www.SID.ir

Archive of SID

و بنابراین

$$\frac{1}{6}e^{-0.974(R-D)}.(\frac{R}{D})^{-(k+\frac{1}{2})} \geq SIR_0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{6}e^{-0.974R(1-Q)}.Q^{(k+\frac{1}{2})} \geq SIR_0$$

$$\Rightarrow -0.974R(1-Q) \geq \ln(6SIR_0Q^{-(k+\frac{1}{2})})$$

لذا، برای برآورده کردن شرط $SIR \geq SIR_0$ نامساوی زیر حاصل می‌شود:

$$R \geq \frac{\ln(6SIR_0Q^{-(k+\frac{1}{2})})}{0.974(Q-1)} = R_0(N) \qquad (۹)$$

از دیگر نیازمندی‌های یک سیستم سلولی آن است که پهنای باندی که به هر کاربر اختصاص می‌یابد از حداقلی، W_0، بزرگتر باشد، $W \geq W_0$. اگر چگالی کاربران در واحد سطح ρ باشد در این صورت تعداد کاربران در یک سلول برابر $\rho\alpha R^2$ خواهد بود. (α برای یک سلول شش ضلعی برابر $\frac{3\sqrt{3}}{2}$ و اگر سلول را دایره فرض کنیم برابر π می‌باشد.) پهنای باند اختصاص یافته به هر سلول برابر B/N است و بنابراین پهنای باند به‌ازای هرکاربر باید نامعادله زیر را ارضاء کند.

$$W = \frac{B/N}{\rho\alpha R^2} \geq W_0 \qquad (۱۰)$$

و برای اینکه این نامساوی برآورد شود، شعاع سلول بایستی از حدی، $R_1(N)$، کمتر باشد.

$$R \leq R_1(N) = \frac{1}{\sqrt{\alpha\rho}}\sqrt{\frac{B}{NW_0}} \qquad (۱۱)$$

همچنین، تعداد کاربران در یک سلول باید از یک بیشتر باشد تا شبکه سلولی معنا پیدا کند در این صورت شرط اضافه زیر را خواهیم داشت:

$$R \geq \frac{1}{\sqrt{\alpha\rho}} \qquad (۱۲)$$

با ترکیب شرایط (۹)، (۱۱) و (۱۲)، محدوده زیر برای شعاع سلول بدست می‌آید:

$$\overline{R}_0(N) \leq R \leq R_1(N) \qquad (۱۳)$$

که در آن

$$\overline{R}_0(N) = \max\{R_0(N), \frac{1}{\sqrt{\alpha\rho}}\}$$

در این صورت تنها مقادیری از (R, N) که شرط فوق را برآوده سازند منجر به یک طراحی صحیح شبکه سلولی زیر آب خواهند شد. شکل) مرزهای تعیین شده در شرط (۱۳) را نشان می‌دهد. شکل) نشان می‌دهد که با تغییر پارامترهای طراحی ممکن است محدوده مجاز کوچکتری برای (N و R) در اختیار داشته باشیم و حتی ممکن است شرایط به گونه‌ای باشد که امکان انجام طراحی، به نحوی که محدودیت‌های سیگنال به تداخل و پهنای باند برآورده شود، وجود نداشته باشد.

۲-۴- تعداد کاربران قابل پشتیبانی و پهنای باند به ازای هر کاربر

یکی از پارامترهایی که ممکن است به عنوان معیار طراحی قرار گیرد، تعداد کاربران قابل پشتیبانی در واحد فرکانس، C، می‌باشد، که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

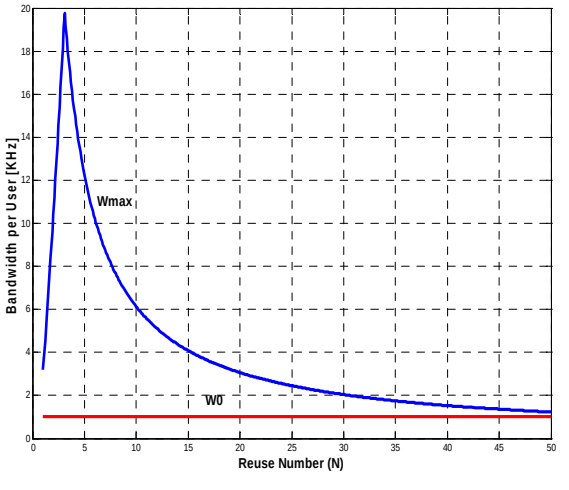
$$C = \frac{\rho\alpha R^2}{B/N} \qquad (۱۴)$$

برای بیشینه کردن این مقدار به ازای یک مقدار خاص N و در نظر گرفتن محدودیت‌های $W \geq W_0$ و $SIR \geq SIR_0$، بیشترین شعاع سلول، $R = R_1(N)$، باید لحاظ شود در این حالت $C_{\max} = 1/W_0$.

همچنین ممکن است لازم باشد پهنای باند به ازای هر کاربر،W، بیشینه شود. در این حالت کوچکترین شعاع سلول، $R = \overline{R}_0(N)$، بایستی انتخاب گردد. با این انتخاب بیشترین مقدار W را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$W_{\max}(N) = \frac{B/N}{\rho\alpha\overline{R}_0^2(N)} \qquad (۱۵)$$

شکل(۴) بیشینه پهنای باند برای هر کاربر به ازای شماره استفاده مجدد را نشان می‌دهد.



شکل۴- بیشینه پهنای باند برای هر کاربر به ازای شماره استفاده مجدد

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۵- محاسبه ظرفیت کاربر

از آنجا که چگالی کاربران نقش اساسی در تعیین شعاع سلول‌های زیرآبی دارد، در این قسمت به محاسبه ظرفیت کاربر می‌پردازیم. ظرفیت کاربر در یک شبکه سلولی زیرآبی برابر بیشترین چگالی کاربرانی که به ازای یک پهنای باند داده شده می‌توان پشتیبانی کرد، تعریف می‌گردد.

برای ارزیابی ظرفیت کاربر به شرط (۱۳) توجه می نمائیم. با توجه به این شرط و برای داشتن یک طراحی معتبر، شرط زیر باید برقرار باشد.

$$\overline{R}_0(N) \le R_1(N) \qquad (۱۶)$$

بنابراین دو حالت خواهیم داشت:

الف) $R_0(N) \le R_1(N)$

ب) $\frac{1}{\sqrt{\alpha\rho}} \le R_1(N)$

در حالت (الف) و با جایگزینی مقادیر داریم

$$\rho \le (B/W_0)/\alpha N R_0^2(N)$$

و در حالت (ب) باید شرط $B \ge NW_0$ برقرار باشد. بنابراین بیشترین چگالی کاربران از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$\rho_{\max}(N) = \begin{cases} (B/W_0)/\alpha N R_0^2(N) & B/W_0 \ge N \\ 0 & B/W_0 < N \end{cases} \qquad (۱۷)$$

در نتیجه بیشترین چگالی کاربران به پهنای باند کلی سیستم و نیازمندی‌های شبکه وابسته است.

۳- نتیجه‌گیری

از آنجا که پهنای باند در کانال‌های صوتی زیر آب بسیار محدود است، استفاده مجدد فرکانسی و در نتیجه بهره‌گیری از مفهوم شبکه‌های سلولی در این کانال‌ها بسیار با اهمیت است. در این مقاله پس از بدست آوردن نسبت سیگنال به تداخل برای کانال‌های صوتی زیرآب، محدوده مجاز برای انتخاب شعاع سلول، تعداد کاربران قابل پشتیبانی در واحد فرکانس، پهنای باند به ازای هر کاربر و ظرفیت کاربر نیز برای شبکه‌های سلولی زیر دریا تعیین شده است.

۴- مراجع

[1] Ian F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia; **"Underwater acoustic sensor networks: research challenges"**, Elsevier, February 2005.

[2] J. Partan, J. Kurose, B. N. Levine; **"A Survey of Practical Issues in Underwater Networks"**, IEEE 2006.

[3] J. Heidemann et al; "**Research Challenges and Applications for Underwater Sensor Networking**", IEEE 2006.

[4] J. H. Cui et al; "**The Challenges of building Scalable Mobile Underwater Wireless Sensor Networks for Aquatic Applications**", IEEE Network, May/June 2006.

[5] D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer; "**The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry**", IEEE J. Oceanic Eng., Vol. OE-25, No. 5, Jan. 2000, pp. 4–27.

[6] M.Stojanovic; "**On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic channel**", in Proc. First ACM International Workshop on Underwater Networks (WUWNet), Sept. 2006.

[7] M.Stojanovic; "**On the design of underwater acoustic cellular systems**", in Proc. IEEE Oceans Conf., 2007.

[8] M.Stojanovic; "**Frequency Reuse Underwater: Capacity of an Acoustic Cellular Network**", in Proc. IEEE Oceans Conf., WUWNet'07, September, 2007.

[9] T.S.Rappaport; "**Wireless communications: Principles and Practice**", Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.

www.SID.ir