راهکارهای ایجاد ارتباط سبز در فناوری DSL

 **سجاد جودکی1، نرگس عرب الجدیدی2**

**1- کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اصفهان، sajjadjoudaki@eng.ui.ac.ir**

 **2- کارشناسی ارشد دانشکده ریاضی دانشگاه اصفهان، nargesarab@sci.ui.ac.ir**

# خلاصه

یک مبحث مهم در استفاده بهینه از سیستم‌های مخابراتی، توان مصرفی سیستم توسط کاربران است. در سال‌های اخیر برخی قیدهای محدودیت میزان توان مصرفی در مسائل‌ بهینه‌سازی تخصیص پهنای باند به کاربران در فناوری خط اشتراک دیجیتال (DSL) وارد گردیده و مخابرات سبز نامیده شده است. در این پژوهش به بررسی شیوه‌های دسترسی به ارتباط سبز در سیستم‌های مخابراتی دسترسی چندگانه پرداخته و فناوری DSL به همراه تکنیک VDSL در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، روش‌های اعمال عدالت در ارتباط سبز با در نظر گرفتن دو معیار معروف عدالت بیشینه-کمینه و عدالت تناسبی بررسی می‌شوند. به منظور بررسی نحوه تاثیر مخابرات سبز در یک شبکه، اعمال عدالت با میزان سبز بودن سیستم ترکیب و تحلیل حاصل مبتنی بر نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی فناوری DSL با مقادیر کابل‌های واقعی انجام شده است. در بخش انتهایی، با بررسی کامل نتایج شبیه‌سازی، راهکارهای اعمال همزمان ارتباط سبز و عدالت بررسی و پیشنهاد‌هایی جهت افزایش میزان سبز بودن شبکه ارائه گردیده است.

**کلمات کليدي: ارتباط سبز، بهینه‌سازی توان، عدالت بیشینه-کمینه، عدالت تناسبی، فناوری DSL**

ABSTRACT

An important topic in the optimal use of communication systems is the consumption power of the system by users. In recent years, some constraints on the amount of the consumption power in optimizing bandwidth allocations in Digital Subscriber Line (DSL) technology which is called green communication have been used for users. In this paper, the ways of accessing green communication in multiple access communication systems and DSL technology along with the VDSL technique are explored. Then, the methods of applying fairness in green communication with considering two well-known criteria of max-min fairness and proportional fairness have been investigated. In order to determine the effect of green communication on a network, the application of fairness with the amount of greening of the system are combined; and the analysis of this based on the results obtained from the simulation of DSL technology with realistic cable values is done. In the final section, with a comprehensive review of simulation results, solutions for simultaneous application of green communication and fairness are investigated; and the suggestions for increasing the amount of greening the network are presented.

**Keywords:** Digital Subscriber Line, green communication, max-min fairness, consumption power, proportional fairness

**1. مقدمه**

امروزه با گسترش و پیشرفت روز افزون تکنولوژی، تکنیک‌های مختلفی جهت انتقال اطلاعات به کار برده می‌شوند. در این میان، ضرورت مدیریت منابع و بهره‌وری بیشتر از ظرفیت سیستم‌های مخابراتی و افزایش کارایی سیستم، امری انکار ناپذیر و همواره مورد تحقیق پژوهشگران این زمینه بوده است. مدیریت مصرف انرژی در حوزه‌های مختلف مخابرات مانند خط اشتراک دیجیتال[[1]](#footnote-1) (DSL) و بیسیم قابل بررسی است اما به دلیل متغیر با زمان بودن کانال بیسیم، فناوری DSL را مد نظر قرار می‌دهیم. به منظور اعمال مدیریت بهینه طیف و انرژی مصرفی، لازم است در مسائل بهینه‌سازی سیستم‌های مخابراتی، قیدهای محدودیت مصرف چگالی طیف توان، اعمال و استفاده از پهنای باند سیستم در حالت‌های بالاسو و پایین‌سو بهینه گردد. تاکنون روش‌های مختلفی جهت افزایش دسترسی به نرخ بیت بیشتر در یک سیستم مخابراتی ارائه شده و همواره سعی بر افزایش بازدهی تکنیک کدگذاری کانال‌های مخابراتی و کاهش شکافSNR[[2]](#footnote-2) در کانال‌های هم‌شنوایی و مستقیم بوده است. به منظور اعمال مخابرات سبز در یک شبکه، مسئله بیشینه‌سازی مجموع نرخ وزن‌دار[[3]](#footnote-3) (WSRM) جهت تخصیص نرخ بیت سبز به کاربران، تعریف می‎گردد و مدیریت طیف توان و نحوه تخصیص منابع، به صورت قید در مسائل بهینه‌سازی وارد می‌گردد.

 در سیستم‌های مخابراتی که از فناوری DSL استفاده می‌کنند، اثر تداخل دریافتی یک کاربر از سایر کاربران امری بسیار مهم است و اگر این اثر حذف گردد یا کاهش یابد، بر مبنای قضیه شانون- هارتلی، نرخ بیت آن کاربر افزایش خواهد یافت و همین امر کافی است تا متناظر با کاهش تداخل دریافتی، جهت ارسال داده با نرخ قبلی، چگالی طیف توان آن کاربر نیز کاهش یابد تا بتوان از ظرفیت سیستم و پهنای باند آن به خوبی استفاده کرده و میزان مصرف انرژی کمینه گردد.

مسئله‌ مدیریت طیف تنها به توان ارسالی یا دریافتی ختم نمی‌گردد و بحث پیچیدگی محاسباتی الگوریتم‌های مد نظر جهت تخصیص نرخ بیت به کاربران، بسیار با اهمیت است. به عنوان مثال، اگر در یک سناریو چند کاربره، از روش تخصیص توان «متعادل‌سازی بهینه طیف[[4]](#footnote-4)» (OSB)]1[ استفاده گردد، کارایی سیستم برای سناریو‌هایی که بیش از 5 کاربر دارند، عملا از کار خواهد افتاد زیرا پیچیدگی این روش از مرتبه نمایی است. به همین منظور از روش‌های دیگری مانند «متعادل‌سازی طیف تکرارشونده[[5]](#footnote-5)» (ISB) ]2[ که پیچیدگی آن بسیار کمتر از OSB است استفاده می‌گردد اما به دلیل اینکه در OSB، ناحیه نرخ[[6]](#footnote-6) کاربران به صورت غیرصریح محدب[[7]](#footnote-7) است و در ISB ممکن است ناحیه نرخ غیرمحدب[[8]](#footnote-8) باشد، لازم است تا الگوریتم ISB به صورت هوشمندانه پیاده‌سازی شود.

به منظور کمینه‌کردن انرژی در یک سیستم مخابراتی و اعمال مخابرات سبز، به کارگیری ضرایب دوگان لاگرانژ[[9]](#footnote-9) در حل مسائل بهینه‌سازی مقید و دست‌یابی به تمام نقاط موجود بر روی ناحیه پیوسته نرخ-توان صریحا محدب، ارائه گردیده است ]3[. با به کارگیری تکنیک مدولاسیون گسسته چندآهنگی[[10]](#footnote-10) (DMT) در فناوری DSL، می‌توان مسئله مدیریت طیف توان را در هر آهنگ به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد. DMT در تکنیک‌های مختلفی مانند خط اشتراک دیجیتال پرسرعت[[11]](#footnote-11) (VDSL) و VDSL2 قابل اجراست و می‌توان برای نسل آینده DSL، مسئله مدیریت پویای طیف[[12]](#footnote-12) (DSM) را در سناریوهای دارای تزویج الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار داد و با اعمال روش‌های برداری کردن[[13]](#footnote-13) و آب پر کردن تکرارشونده[[14]](#footnote-14) (IWF)، انتقال بدون هم‌شنوایی دور-انتها[[15]](#footnote-15) (FEXT) داشت ]4[. اهمیت برداری کردن تا آنجاست که موجب ذخیره‌سازی قابل توجه انرژی در حضور خطای بسیار زیاد تخمین کانال و پیچیدگی پایین در پیاده‌سازی است]5[.

به منظور اعمال مخابرات سبز در یک سیستم مخابراتی، لازم است شاخص‌هایی مانند هزینه سبز‌سازی[[16]](#footnote-16) و شاخص سبزسازی[[17]](#footnote-17) به طور کامل مورد بررسی قرار گیرند زیرا با این کار می‌توان معیار‌ها و روش‌های مختلف جهت سبزسازی را با یکدیگر مقایسه کرد و از بین آنها، یک یا چندین معیار را انتخاب نمود. همچنین می‌توان مسئله‌ سبزسازی را با عدالت ترکیب کرد و پس از تخصیص نرخ بیت به کاربران، میزان عدالت اعمال‌شده و سبز بودن سیستم را توام بررسی کرد. باید در نظر داشت که کمینه‌سازی توان سیستم منجر به تقسیم غیرمنصفانه منابع می‌گردد ]6[.

 به منظور بهبود بهره‌وری توان، تحقیقات گسترده‌ای جهت کاهش تداخل بین کاربران و برداری کردن فناوری DSL صورت پذیرفته است و با عنوان «ارتباط سبز» یاد می‌گردد ]7-15[. عملیات برداری کردن یک سیستم مخابراتی با فناوری DSL در سطوح مختلف انجام می‌پذیرد و موجب کاهش اثر الکترومغناطیسی زوج‌سیم‌[[18]](#footnote-18)های کاربران بر روی یکدیگر و افزایش محدوده نرخ بیت‌های قابل دست‌یابی توسط برخی کاربران می‌شود. باید در نظر داشت که مصالحه‌ای بین افزایش نرخ بیت یک کاربر و افزایش تداخل سایر کاربران وجود دارد و این امر منجر به تقابل بین بیشینه‌سازی نرخ داده‌ها و بیشینه‌سازی توان می‌گردد. بر مبنای قضیه معروف شانون- هارتلی، کاهش توان منجر به کاهش نرخ بیت کاربران می‌شود و همان‌گونه که سبزسازی را با کمینه‌سازی توان مصرفی معادل گرفتیم، این کاهش توان را می‌توان به عنوان هزینه سبزسازی در نظر گرفت. بنابراین لازم است روشی ارائه‌ گردد که علاوه بر افزایش رضایت کاربران از نرخ بیت دریافتی، موجب هدر رفتن پهنای باند سیستم نگردد.

**2. توصیف سیستم و تعریف مسئله**

یک سیستم مخابراتی با N کاربر در نظر می‌گیریم. با فرض اینکه از مدولاسیون DMT با K آهنگ به گونه‌ای که تمامی کاربران در سمت گیرنده هماهنگ شده‌اند، استفاده گردد و درنظر گرفتن به عنوان حداکثر تعداد بیت‌های قابل اعمال در هر آهنگ، می‌توان تعداد بیت‌های قابل اعمال در آهنگ k اُم وکاربرn اُم را از رابطه زیر محاسبه نمود:

(1)

 دررابطه (1)، ، ،، و به ترتیب بیانگر چگالی طیف توان کاربرn اُم در آهنگ k اُم، تابع انتقال کانال مستقیم کاربر n اُم، چگالی طیف توان نویز کاربرn اُم در آهنگ k اُم و تابع انتقال از فرستنده m اُم و گیرنده n اُم هستند. اکنون مسئله بیشینه‌سازی مجموع وزن‌دار نرخ (WSRM) را به صورت رابطه (2) تعریف می‌کنیم]16[.

 (2)

در صورتی که بردار در برگیرنده بیت تمامی کاربران در آهنگ k اُم به صورت زیر باشد، آنگاه می‌توان بردار چگالی طیف توان تمامی کاربران در آهنگ k اُم را به صورت زیر در نظر گرفت:

(3)

(4)

(5)

که پارامترهای به کاربرده شده در رابطه‌های (3) و (4) و (5)، به صورت زیر تعریف می‌‌گردند:

(6)

(7)

(8)

(9)

پس از محاسبه مجموعه ‌نرخ بیت‌های به دست آمده به ازای وزن‌های مختلف، آنگاه ناحیه نرخ به صورت زیر تعریف می‌گردد]16[:

(10)

که در رابطه (10)، علامت بیانگر جمع مینکووسکی میان دو مجموعه در فضای است:

(11)

هر یک از رابطه‌های (1) تا (11) دارای اهمیت بسیار هستند زیرا جهت اعمال مخابرات سبز، لازم است میزان توان مصرفی محاسبه شود و محدودیت‌هایی جهت افزایش بیش از حد توان مصرفی، به هنگام حل مسئله‌ بهینه‌سازی در نظر گرفته شود.

**3.** **سبز‌سازی و ایجاد عدالت**

در این بخش ابتدا به معرفی روش‌های سبز‌سازی یک سیستم مخابراتی و در ادامه به شیوه‌های اعمال عدالت در مخابرات سبز می‌پردازیم. باید در نظر داشت که اعمال عدالت همواره به معنای توزیع یکسان منابع در بین کاربران نیست و روش‌های متنوعی جهت اعمال عدالت وجود دارد. در این بخش به بررسی دو روش معروف‌ اعمال عدالت که معیار بیشینه-کمینه و معیار عدالت تناسبی نام دارند، می‌پردازیم. به منظور اعمال معیار عدالت تناسبی از تابع سود ]17[ که برای مقادیر مختلف به صورت رابطه‌ (12) تعریف می‌گردد، استفاده می‌کنیم. در تابع سود اگر و آنگاه پاسخ‌های نتیجه‌شده به ترتیب بیانگر نرخ بیت‌های ناشی از معیار عدالت تناسبی و معیار عدالت بیشینه-کمینه هستند:

(12)

در رابطه (12)، بیانگر مقدار نرخ تخصیص یافته (توان) به کاربر r اُم است. در صورتی که نرخ بیت‌ و توان مصرفی به دست آمده برای کاربر n اُم برابر و و تعداد کل کاربران N باشد، آنگاه شاخص سبز و شاخص سبزسازی منصفانه[[19]](#footnote-19) به صورت زیر تعریف می‌گردند]6[:

(13)

(14)

(15)

که در رابطه‌های (13) و (14) و (15) ، را به عنوان پاسخ مسئله WSRM با بردار وزن، بیانگر بیشترین توان قابل ارسال و را نرخ سمبل DMT در نظر می‌گیریم.

 به منظور سبزسازی یک سیستم مخابراتی، می‌توان آن را در حوزه‌های مختلفی مانند سبز‌سازی منصفانه توان، سبز‌سازی منصفانه نرخ، سبز‌سازی نسبت توان به نرخ و سبز‌سازی مجموع نرخ وزن دار با در نظر گرفتن تابع سود بررسی کرد]6[. باید در نظر داشت که همواره رسیدن به هدف، موجب ضرر نمی‌گردد اما در بعضی موارد، مصالحه‌ای بین اهداف وجود دارد. به عنوان مثال، اگر مصرف انرژی کمینه گردد نباید انتظار داشت که نرخ بیت کاربران کاهش نیابد و برخی کاربران به دلیل ارضا نشدن حداقل نرخ بیت دریافتی مورد نیاز، از سیستم حذف نگردند.

 در بخش شبیه‌سازی با در نظر گرفتن کانال DSL به صورت ]18[ و اعمال تکنیک VDSL در فناوری DSL، یک نقشه باند و انجام شبیه‌سازی بر مبنای مدولاسیون DMT، به بررسی راهکارهای معرفی شده جهت سبز‌سازی و اعمال عدالت در فناوری DSL می‌پردازیم.

**4. شبیه‌سازی**

در این بخش با در نظر گرفتن دو سناریو و شبیه‌سازی آن‌ها در نرم افزار MATLAB به تحلیل روش‌های سبز‌سازی و اعمال عدالت در یک شبکه مخابراتی می‌پردازیم. مقادیر لازم برای شبیه‌سازی با در نظر گرفتن کابل 26-AWG به همراه مقادیر جدول1 مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سناریو‌های اول و دوم،که به ترتیب دو کاربر که در فاصله‌های 500 و 700 متری و دو کاربردر فاصله‌های 250 و 650 متری از اداره مرکزی[[20]](#footnote-20) (CO) قرار گرفته‌اند در نظر می‌گیریم و محل قرار گیری کاربر را تجهیزات کاربر[[21]](#footnote-21) (CP) می‌نامیم. پس از اعمال معیارهای عدالت بیشینه-کمینه و عدالت تناسبی، مجموعه پاسخ های به دست آمده را بر روی ناحیه نرخ نمایش می‌دهیم و مقادیر شاخص سبزسازی منصفانه و شاخص سبز را به صورت جدول‌های 2و3 محاسبه می‌کنیم. نحوه قرار گیری کاربران در شکل‌های 3و4 و نتایج حاصل از اعمال معیار‌های عدالت، در هر سناریو به صورت شکل‌های 1و2 بر روی ناحیه نرخ نمایش داده شده است . سعی شده است اثر تداخل کاربران تحلیل این بخش به طور کامل در بخش بعد انجام می‌شود.

|  |
| --- |
| **جدول 1- مقادیر شبیه‌سازی فناوری DSL با تکنیک VDSL** |
|

|  |  |
| --- | --- |
| **پارامتر** | **مقدار** |
| نقشه باند (بالاسو) | 3-5.1 MHz , 7.05-12 MHz |
| نویز | نویز سفید ،  |
| بیشترین توان مودم/ بیشترین توان در هر آهنگ | 12mW |
| نرخ سمبل ،  |  |
| بیشترین مقدار بیت قابل اعمال در هر آهنگ،  | 15 |
| شکاف SNR ( ) | 12.0 dB |

 |

****

**شکل 1- ناحیه نرخ سناریو اول به همراه نتایج حاصل از اعمال راهکارهای سبز‌سازی سیستم شبکه**



**شکل 2- ناحیه نرخ سناریو دوم به همراه نتایج حاصل از اعمال راهکارهای سبز‌سازی سیستم شبکه**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **شکل3- موقعیت کاربران در سناریو اول** | **شکل4- موقعیت کاربران در سناریو دوم** |

|  |  |
| --- | --- |
| **جدول2- نتایج حاصل از روش‌های سبزسازی شبکه****و اعمال عدالت در سناریو دوم** | **جدول3- نتایج حاصل از روش‌های سبز‌سازی شبکه****و اعمال عدالت در سناریو اول** |
|

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **بیشینه-کمینه** | **تناسبی** | **معیار****شاخص** |
| **0.2958** | **0.2082** | **سبز** |
| **0.3718** | **0.7044** | **سبز‌سازی منصفانه** |

 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **بیشینه-کمینه** | **تناسبی** | **معیار****شاخص** |
| **0.4855** | **0.5965** | **سبز** |
| **0.8906** | **0.9428** | **سبز‌سازی منصفانه** |

 |

**5. نتیجه‌گیری**

بر مبنای نتایج بخش شبیه‌سازی، می‌توان دید که هرچه از ظرفیت سیستم و توان یک مودم بیشتر استفاده گردد، از مخابرات سبز دور خواهیم شد و شاخص سبز به صفر میل می‌کند. می‌توان انتظار داشت شاخص سبز‌سازی منصفانه در معیار عدالت تناسبی، همواره بیشتر از معیار عدالت بیشینه-کمینه است و هرچه سناریو از تقارن بیشتری برخوردار و فاصله کاربران از CO بیشتر باشد، شاخص سبز کمتر است. اگر یکی از کاربران در فاصله‌ای دور از کاربر دیگر قرار داشته باشد، میزان توان مصرفی افزایش می‌یابد زیرا به دلیل تضعیف بسیار زیاد، سیستم باید توان بیشتری جهت انتقال داده به کاربر دورتر صرف کند و همین امر موجب کاهش شاخص سبز و میل کردن آن به صفر می‌شود. بنابراین باید روش‌هایی مانند برداری کردن در سطوح مختلف و اعمال مدل هم‌شنوایی بتا جهت کاهش اثر تزویج الکترومغناطیسی بین زوج‌سیم‌های کاربران به کار برد تا شاخص سبز بودن افزایش یابد و تضعیف ناشی از افزایش فاصله کاربران از اداره مرکزی، تاثیر کمتری بر نرخ انتقال داده گذارد.

**6.** **کار‌های آینده**

 با توجه به گسترش روز‌‌افزون تکنولوژی می‌توان برای ادامه‌ی نتیجه این پژوهش، سیستم مد نظر را با تکنیک VDSL2 در نظر گرفت و سبز‌سازی را با معیارهای معروفی از جمله آنتروپی ترکیب نمود. قطعا انتخاب یک معیار، امری سخت و در بعضی موارد غیر ممکن است زیرا با بالارفتن تعداد کاربران یک شبکه، امکان افزایش تداخل دریافتی ناشی از سایر کاربران بیشتر می‌گردد، بنابراین لازم است تا هماهنگی‌های لازم در سطح سیگنال انجام پذیرد و روش‌های حذف تداخل مانند برداری کردن، در حل مسئله وارد گردند تا ناحیه نرخ حالت مستطیلی پیدا کند و انتخاب نقاط جهت سبز‌سازی شبکه، آسان‌تر صورت پذیرد.

**مراجع**

1. Cendrillon, R., Yu, W., Moonen, M., Verlinden, J. and Bostoen, J., (2006), "Optimal multiuser spectrum balancing for digital subscriber lines," IEEE Transactions on Communications, **54**(5), pp. 922-933.

2. Cendrillon, R. and Moonen, M., (2005), "Iterative spectrum balancing for digital subscriber lines," IEEE International Conference on Communications, 2005. ICC 2005. 2005, Seoul, pp. 1937-1941.

3. Forouzan, A. R. and Moonen, M., (2011), "Lagrange Multiplier Optimization for Optimal Spectrum Balancing of DSL with Logarithmic Complexity," 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kyoto, pp. 1-6.

4. Song, K. B., Chung, S. T., Ginis, G. and Cioffi, J. M., (2002), "Dynamic spectrum management for next-generation DSL systems," IEEE Communications Magazine, **40**(10), pp. 101-109.

5. Marrocco, G., Wolkerstorfer, M., Nordstrom, T. and Statovci, D., (2011), "Energy-Efficient DSL Using Vectoring," 2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011, Kathmandu, pp. 1-6.

6. Tsiaflakis, P., Yi, Y., Chiang, M. and Moonen, M., (2011), "Fair greening of broadband access: spectrum management for energy-efficient DSL networks," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, **140**(1), 1-17.

7. Yu, W., Ginis, G. and Cioffi, J. M., (2002), "Distributed multiuser power control for digital subscriber lines," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, **20**(5), pp. 1105-1115.

8. Tsiaflakis, P., Vangorp, J., Moonen, M. and Verlinden, J., (2007), "A low complexity optimal spectrum balancing algorithm for digital subscriber lines", Signal Processing, **87**(7), pp. 1735-1753.

9. Wolkerstorfer, M., Statovci, D. and Nordstrom, T., (2008), "Dynamic spectrum management for energy-efficient transmission in DSL," 2008 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, pp. 1015-1020.

10. Nordström, T., Statovci D. and Wolkerstorfer, M., (2009), "Energy efficient power back-off management for VDSL2 transmission," 2009 17th European Signal Processing Conference, Glasgow, pp. 2097-2101.

11. Monteiro, M., Lindqvist N. and Klautau, A., (2009), "Spectrum Balancing Algorithms for Power Minimization in DSL Networks," 2009 IEEE International Conference on Communications, Dresden, pp. 1-5.

12. Guenach, M., Nuzman, C., Maes, J. and Peeters, M., "On Power Optimization in DSL Systems," 2009 IEEE International Conference on Communications Workshops, Dresden, 2009, pp. 1-5.

13. Mohammadian, R., Biguesh M. and Gazor S., (2010), "A Power Allocation Method for DMT-Based DSL Systems Using Geometric Programming," IEEE Signal Processing Letters, **17**(1), pp. 16-119.

14. Tsiaflakis, P., Yi, Y., Chiang, M. and Moonen, M., (2010), "Dynamic Spectrum Management for Fast and Fair Green DSL," submitted to IEEE Trasanctions on Signal Processing.

15. Tsiaflakis, P., Yi, Y., Chiang, M. and Moonen, M., (2010), "Fair greening for DSL broadband access," ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, **37**(4), pp. 74-78.

16. Forouzan, A. R., (2009), "Optimal spectrum management of DSL with nonstrictly convex rate region. IEEE Transactions on Signal Processing, **57**(7), pp. 2558-2568.

17. Nilsson, P., (2006), "Fairness in communication and computer network design", Department of communication systems, Lund University.

18. Spectrum Management for Loop Transmission Systems, ANSI Std. T1.417, (2003).

1. Digital Subscriber Line [↑](#footnote-ref-1)
2. Signal-to- Noise Ratio [↑](#footnote-ref-2)
3. Weighted Sum Rate Maximization [↑](#footnote-ref-3)
4. Optimal Spectrum Balancing [↑](#footnote-ref-4)
5. Iterative Spectrum Balancing [↑](#footnote-ref-5)
6. Rate region [↑](#footnote-ref-6)
7. Nonstrictly convex [↑](#footnote-ref-7)
8. Nonconvex [↑](#footnote-ref-8)
9. Dual Lagrange multipliers [↑](#footnote-ref-9)
10. Discrete Multi-Tonemodulation [↑](#footnote-ref-10)
11. Very-high-bit-rate Digital Subscriber L:ine [↑](#footnote-ref-11)
12. Dynamic Spectrum Management [↑](#footnote-ref-12)
13. Vectoring [↑](#footnote-ref-13)
14. Iterative Water-Filling [↑](#footnote-ref-14)
15. Far end crosstalk [↑](#footnote-ref-15)
16. Price of greening [↑](#footnote-ref-16)
17. Greening index [↑](#footnote-ref-17)
18. Twisted pair [↑](#footnote-ref-18)
19. Fair greening index [↑](#footnote-ref-19)
20. Central office [↑](#footnote-ref-20)
21. Customer premises [↑](#footnote-ref-21)