

بررسی و شبیه سازی طرح کنترل توان در سیستم های مخابراتی برداشت کننده انرژی

نصراالله بیات^۱، آذر محمودزاده^{۲*}، فاطمه صفایی^۳

۱-دانشکده مهندسی برق، دانشگاه غیرانتفاعی پاسارگاد، شیراز، ایران
m.bayat265@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
azar_mahmoodzadeh@yahoo.com

۳- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه غیرانتفاعی پاسارگاد، شیراز، ایران
Samaneh.safaei@gmail.com

چکیده: در این مقاله، یک طرح کنترل توان بهینه برخط، برای یک کانال مخابراتی تک فرستنده-تک گیرنده با کانال محوشدگی و توزیع مشخص مورد مطالعه قرار گرفته است. در این سیستم مخابراتی، ظرفیت باتری محدود در نظر گرفته شده است. هدف، حداکثر نمودن نرخ ارسال داده روی کل بازه مخابراتی می باشد. در این الگوریتم با پیچیدگی کم مبتنی بر بهینه سازی محدب آنلاین برای تضمین در دسترس بودن انرژی، گره برداشت کننده انرژی و به حداکثر رساندن متوسط نرخ ارسال داده طولانی مدت پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی حداکثر توان انتقال را با اطلاع از وضعیت شارژ محدود می کند و توان انتقال را بر اساس اطلاعات تاریخی تخصیص می دهد. علاوه بر این، قیدهای مربوط به در دسترس بودن انرژی با تجزیه و تحلیل نظری دقیق ارائه می شود به طوری که بهینه سازی میانگین توان بلند مدت را تضمین می کند. این روش نسبت به هم تایان خود روش چشمگیری می باشد.

واژه های کلیدی: برداشت انرژی از محیط، ظرفیت محدود باتری، کانال محوشدگی، مخابرات بی سیم، بهینه سازی توان.

Investigation and simulation of power control plan in energy harvesting telecommunication systems

Nasrollah Bayat¹, Azar Mahmoodzadeh^{2*}, Fatemeh Safaei³

¹ Department of Electrical Engineering, Pasargad University, Shiraz, Iran
M.bayat265@gmail.com

² Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
azar_mahmoodzadeh@yahoo.com

³ Department of Electrical Engineering, Pasargad University, Shiraz, Iran
Samaneh.safaei@gmail.com

Abstract:

In this article, we study an online optimal power control scheme for a single-transmitter, single-receiver telecommunication channel with specific fading and distribution channels. In this telecommunication system, the battery capacity is considered limited. Our goal is to maximize the data transmission rate over the entire telecommunication range. In this low-complexity algorithm based on online convex optimization, it is proposed to guarantee the energy availability, the energy harvesting node and to maximize the average long-term data transmission rate. The proposed algorithm limits the maximum transmission power by knowing the state of charge and allocates the transmission power based on historical information. In addition, constraints on energy availability are presented with detailed theoretical analysis. So that optimization of long-term average power is guaranteed. This method is an impressive method compared to its counterparts.



Keywords: Harvesting energy from the environment, limited battery capacity, feeding channel, wireless communication, power optimization.

DOI: 00.00000/0000

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۳

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵

۱- مقدمه

تصمیم‌گیری مارکوف^۵ یا مدل رگرسیون بر اساس داده‌های آماری باشد. در [۹-۱۰] نویسندگان نرخ انرژی ورودی و توزیع کانال را به‌عنوان فرآیند مارکوف با احتمال انتقال شناخته شده مدل‌سازی می‌کنند و مسئله کنترل توان را به‌صورت علی با استفاده از تکنیک‌های برنامه‌نویسی پویا^۶ حل کردند. زمانی که وضعیت کانال مخابراتی دارای محوشدگی پایینی است، به عبارتی وضعیت کانال خوب است و فرستنده انرژی بیشتری را برای انتقال اختصاص می‌دهد، اما زمانی که کانال مخابراتی دارای محوشدگی بالایی است به عبارتی وضعیت کانال بد است و فرستنده انرژی کمتری را برای ارسال تخصیص می‌دهد. در [۱۱-۱۲] کنترل توان برای مدل نگاه به جلو به ازای باتری با ظرفیت محدود بررسی شده است. در این مدل فرض می‌شود که انرژی ورودی به ازای یک پنجره ثابت توسط فرستنده دانسته شده است. بنابراین مدل نگاه به جلو یک لینک بین دو مدل غیر برخط و برخط می‌باشد، زیرا در مدل غیر برخط اندازه پنجره، بینهایت و در مدل برخط اندازه پنجره، صفر است. در [۱۱] یک طرح کنترل توان بهینه برای مدل نگاه به جلو به ازای انرژی ورودی با توزیع برنولی و کانال بدون محوشدگی ارائه شده است.

۲- مدل سیستم

در این مقاله یک سیستم مخابراتی برداشت‌کننده انرژی شامل یک فرستنده-یک گیرنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرستنده و گیرنده از طریق یک کانال مخابراتی شامل k زیرکانال و با محوشدگی ریلی^۷ به یکدیگر متصل شده‌اند. فرستنده به یک باتری با ظرفیت ذخیره انرژی $(c \geq 0)$ مجهز شده است. به طور کلی یک سیستم مخابراتی زمان-گسسته با یک فرستنده و یک گیرنده مورد مطالعه می‌باشد که در هر بازه زمانی به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$R_t = \sqrt{\delta} X_t + N_t \quad (1)$$

که در آن R_t سیگنال دریافتی گیرنده، X_t سیگنال ارسالی فرستنده در بازه زمانی t می‌باشد. δ ضریب تضعیف کانال است که از یک توزیع مشخص پیروی می‌کند. N_t نویز سفید گوسی جمع شونده (AWGN) می‌باشد. به طوری که میانگین نویز، صفر و واریانس آن یک در نظر گرفته شده است. در این مقاله فرض بر این است که فرستنده در لحظه t تنها از انرژی ورودی و وضعیت کانال (ضریب تضعیف کانال) تا آن

مخابرات سبز از سال ۲۰۰۷ با هدف ساخت یک سیستم مخابراتی که بتواند انرژی موردنیاز خود را از منابع تجدید پذیر فراهم نماید مورد توجه قرار گرفت [۱]. با توجه به مقالات ارائه شده تاکنون سه دسته کلی از طرح‌های کنترل توان وجود دارد که شامل مدل غیر برخط^۱، مدل برخط^۲، مدل نگاه به جلو^۳ است. در مدل کنترل توان غیر برخط، فرض می‌شود که فرستنده^۴ از تحقق کل فرآیند انرژی ورودی وضعیت کانال (ضریب تضعیف کانال) تا انتهای زمان ارسال از قبل مطلع است. یک طرح کنترل توان بهینه غیر برخط برای حالت باتری با ظرفیت نامحدود و کانال بدون محوشدگی و دارای نویز گوسی سفید جمع شونده در [۲] استخراج شده است. در [۳-۴] نویسندگان مدل غیربرخط، کانال‌های دارای محوشدگی را مورد بررسی قرار دادند. به‌طور کلی، طرح‌های بهینه برای مدل غیر برخط تلاش می‌کنند تا انرژی را در سراسر افق زمانی تا حد امکان به طور یکنواخت تخصیص دهند و در عین حال سعی می‌کنند تا از اتلاف انرژی به دلیل سرریز باتری جلوگیری نمایند. اگرچه کنترل توان آفلاین به خوبی مورد بررسی قرار گرفته است، درک ما از کنترل توان کاملاً محدود است. این وضعیت را می‌توان تا حد زیادی به تفاوت‌های تکنیکی بین این دو مسئله کنترل توان نسبت داد. برای کنترل توان غیر برخط، تحقق کل فرآیند انرژی ورودی از قبل شناخته‌شده است، در مقابل، برای کنترل توان برخط، فرستنده از میزان انرژی ورودی آینده و ضریب تضعیف کانال بعدی اطلاعی ندارد و اطلاعات در مورد وضعیت کانال و انرژی برداشت شده به‌صورت علی در اختیار فرستنده قرار می‌گیرد. در مدل کنترل توان برخط [۵-۶] فرض می‌شود که فرستنده آمارگان فرآیند انرژی ورودی برداشت شده را می‌داند یا اطلاعات علی در مورد تحقق آنها دارد. در این حالت، فرآیند انرژی ورودی برداشت شده به‌عنوان مدل تقریبی مدل می‌شود. در [۷] طرح کنترل توان برخط بهینه به ازای انرژی ورودی با توزیع برنولی مطالعه شده است. در این حالت، فرآیند انرژی ورودی برداشت شده به صورت تقریبی مدل می‌شود و طرح‌های کنترل توان برخط براساس مدل‌های از پیش تعریف شده در مورد تخصیص انرژی تصمیم می‌گیرند. بنابراین بر اساس مطالعات انجام شده در [۸] مدل می‌تواند یک فرآیند

¹ Off-line

² Online

³ Look-ahead

⁴ Transmitter (TX)

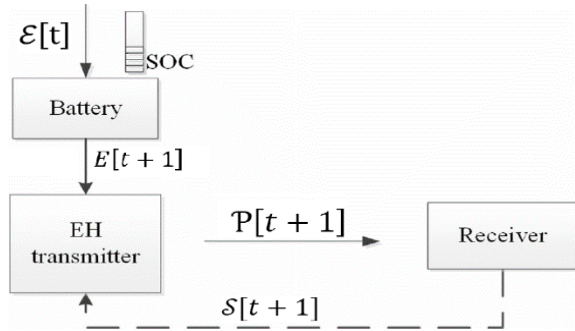
⁵ Markov Decision Process (MDP)

⁶ Dynamic Programming (DP)

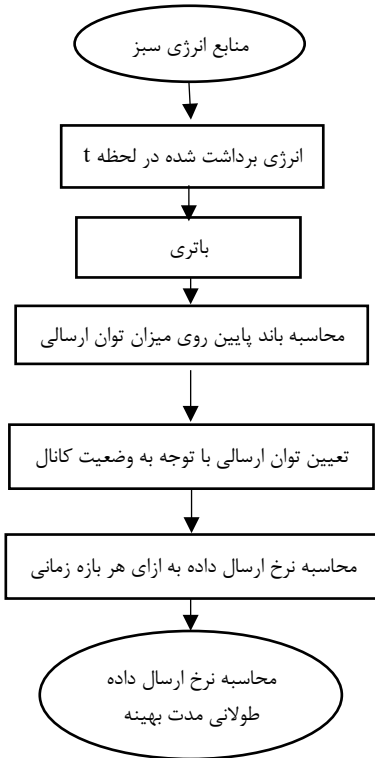
⁷ Rayleigh



$E[t + 1] = E[t] + \mathcal{E}[t] - P[t]$
 که در آن $0 \leq E[t + 1] \leq E_{\max}$ و $P[t] = \sum_{j=1}^k P_j[t]$ می‌باشد. بنابراین هدف نهایی این کار، تعیین یک طرح کنترل توان بهینه Γ^* جهت دستیابی به متوسط نرخ ارسال داده بیشینه \mathcal{R}_{Γ}^* می‌باشد. این مقاله مساله را برای کانال دارای محوشدگی و انرژی ورودی با توزیع مشخص و به ازای باتری با ظرفیت محدود حل می‌کند. در شکل (۲) بلوک دیاگرام کلی طرح نشان داده می‌شود.



شکل (۱): مدل یک سیستم مخابراتی برداشت کننده انرژی [۱۳].



شکل (۲): بلوک دیاگرام کلی طرح پیشنهادی.

همچنین فلوجارت کلی طرح پیشنهادی در شکل (۳) به این شرح می‌باشد. با توجه به فلوجارت کلی طرح پیشنهادی در روش برخط ظرفیت باتری محدود می‌باشد. در این روش از میزان انرژی ورودی و ضریب تضعیف کانال اطلاعی در دسترس نمی‌باشد. در نتیجه با افزایش انرژی ورودی (باتوجه به ظرفیت کم باتری) باعث سرریز باتری و کاهش نرخ ارسال داده می‌شود و عملیات به پایان می‌رسد. ولی با نوآوری در

لحظه اطلاع دارد. هم چنین توزیع انرژی ورودی و ضریب تضعیف کانال در فرستنده دانسته فرض می‌شود. در ابتدای بازه زمانی t ، فرستنده (برداشت کننده انرژی) میزان انرژی تخصیص داده شده جهت انتقال داده را توسط بردار زیر تعیین می‌کند.

$$P[t] = [P_1[t], P_2[t], \dots, P_k[t]] \quad (2)$$

که در آن $t \in \mathbb{N}$ (مجموعه اعداد طبیعی) و $P_j[t]$ میزان انرژی تخصیص داده شده به زیرکانال f در بازه زمانی t است. میزان انرژی برداشت شده (توسط فرستنده) در بازه زمانی t با $\mathcal{E}[t]$ نشان داده می‌شود که در پایان بازه زمانی t دانسته فرض می‌شود. ظرفیت باتری با E_{\max} تعریف می‌شود. همچنین میزان انرژی قابل دسترس درون باتری در ابتدای بازه زمانی $t + 1$ با $E[t + 1]$ نشان داده می‌شود که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$E[t + 1] = E[t] + \mathcal{E}[t] - P[t] \quad (3)$$

که در آن $0 \leq E[t + 1] \leq E_{\max}$ و $P[t] = \sum_{j=1}^k P_j[t]$ می‌باشد. حداکثر توان انتقال در هر بازه زمانی با P_{\max} تعریف شده است. مجموعه شدنی مربوط به تخصیص انرژی بصورت زیر است.

$$\mathcal{Q} = \{P \in \mathbb{R}_+^k \mid \sum_{j=1}^k P_j \leq P_{\max}\} \quad (4)$$

که در آن \mathbb{R}_+^k نشان دهنده مجموعه بردارهایی در فضای k بعدی است به طوری که هر یک از درایه‌های آن بردار نامنفی می‌باشد. به عبارت دیگر به ازای هر $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ داریم: $P_j \geq 0$

در شکل (۱) مدل یک سیستم مخابراتی برداشت کننده انرژی نشان داده شده است. در شروع بازه زمانی $t + 1$ فرستنده انرژی $P[t + 1]$ را به ازای کانال محوشدگی با وضعیت $\mathcal{S}[t + 1]$ جهت ارسال تخصیص می‌دهد. وضعیت همه زیرکانال‌ها در بازه زمانی t توسط بردار $\mathcal{S}[t] = [\mathcal{S}_1[t], \mathcal{S}_2[t], \dots, \mathcal{S}_k[t]]$ بیان می‌شود. بنابراین ظرفیت زیرکانال j ام از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$C_j = \log(1 + \mathcal{S}_j[t]P_j[t]) \quad (5)$$

بنابراین نرخ ارسال داده متناظر با همه زیرکانال‌ها (k زیرکانال) در بازه زمانی t برابر است با:

$$\mathcal{T}_t(P[t]; \mathcal{S}[t]) = \sum_{j=1}^k \log(1 + \mathcal{S}_j[t]P_j[t]) \quad (6)$$

که یک تابع مقعر^۱، غیرکاهشی و نامنفی می‌باشد. همچنین $\mathcal{T}_t(P[t]; \mathcal{S}[t])$ تابعی از طرح کنترل توان Γ می‌باشد. بنابراین طرح کنترل توان Γ میزان انرژی تخصیص داده شده به هر بازه زمانی $(P[t] : (t=1, 2, \dots, T))$ روی افق زمانی T را به گونه ای تعیین می‌کند که فرستنده بیشترین اطلاعات را بر روی همه زیرکانال‌ها در کل بازه‌های زمانی $t=1, 2, \dots, T$ انتقال دهد. بنابراین هدف، بیشینه کردن متوسط نرخ ارسال داده روی سر تاسر افق زمانی T می‌باشد که توسط رابطه زیر مشخص شده است.

$$\max_{\mathcal{R}_{\Gamma}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathcal{T}_t(P[t]; \mathcal{S}[t]) \quad (7)$$

$$\text{Subject: } \mathcal{Q} = \{P \in \mathbb{R}_+^k \mid \sum_{j=1}^k P_j \leq P_{\max}\}$$

¹ concave



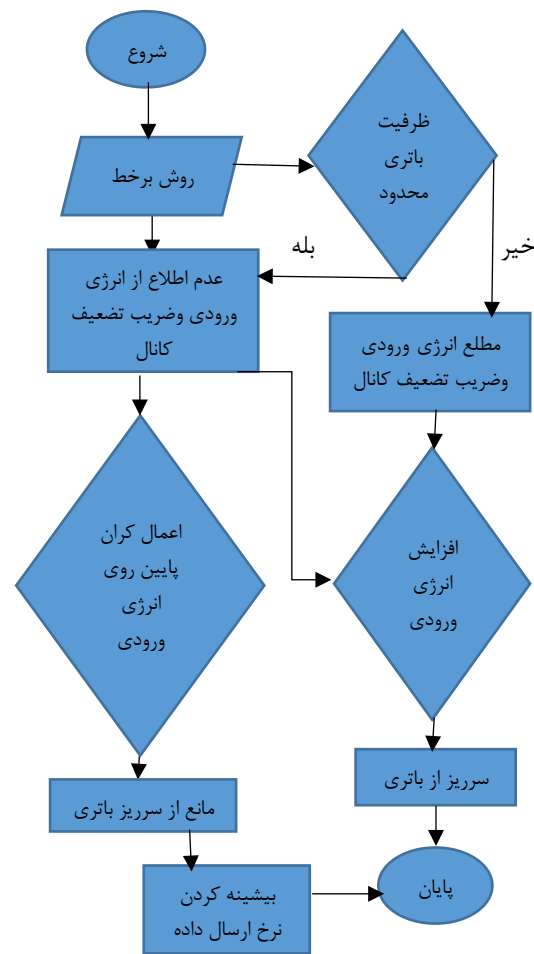
جدول (۱): مقایسه روشهای کنترل توان در مقالات قبل

مدل غیر برخط	مدل نگاه به جلو	مدل برخط
ظرفیت باتری نامحدود	ظرفیت باتری نامحدود	ظرفیت باتری محدود
ضریب تضعیف کانال ثابت	ضریب تضعیف کانال ثابت	ضریب تضعیف کانال ندارد
مطلع از انرژی ورودی و ضریب تضعیف کانال	مطلع از انرژی ورودی و ضریب تضعیف کانال	مطلع از انرژی ورودی و ضریب تضعیف کانال
اساس روش: انرژی ورودی غیرارگودیک و ضریب تضعیف کانال	اساس روش: فرایند ایستای مارکوف	اساس روش: چارجوب لیاپانوف
مشکل طرح: فرض داشتن اطلاع از انرژی ورودی آینده غیر عملی است	مشکل طرح: تغییرات تضعیف کانال مورد بررسی قرار نگرفت	مشکل طرح: با افزایش انرژی ورودی، سرریز باتری و کاهش نرخ ارسال داده دارد

این مقاله و با اعمال کران پایین بر روی انرژی ورودی مانع از سرریز انرژی از باتری، عدم توقف داده و افزایش نرخ ارسال داده شده و در نهایت عملیات پایان یافته است. همچنین در صورتی که از انرژی ورودی و ضریب تضعیف کانال در آینده اطلاعی در دسترس باشد [۱۳] با افزایش انرژی ورودی شاهد سرریز انرژی از باتری خواهیم بود و در نهایت عملیات تمام می‌شود.

۳- الگوریتم پیشنهادی

در این بخش الگوریتم پیشنهادی برای کنترل توان در سیستم‌های مخابراتی برداشت‌کننده انرژی شرح داده می‌شود.



شکل (۳): فلوچارت کلی طرح پیشنهادی.

۳-۱- روش پیشنهادی برای طرح کنترل توان سیستم‌های مخابراتی برداشت‌کننده انرژی

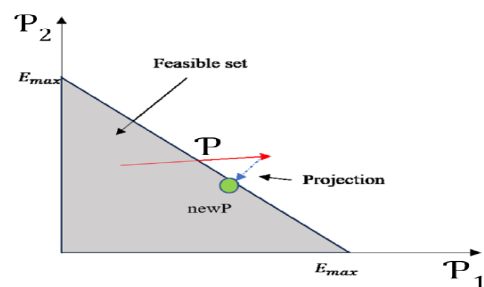
در بهینه‌سازی محدب آنلاین سنتی، توان تخصیص داده شده به بازه زمانی بعدی $P[t+1]$ تصویربردار توان، درون مجموعه شدنی ثابت است و توسط روش شیب نزول آنلاین به دست می‌آید. مجموعه شدنی توسط ظرفیت باتری مقید شده است. به عنوان یک تابع محدب، توان تخصیص داده شده $P[t+1]$ بدون هیچ محدودیتی برابر با ظرفیت باتری خواهد بود، به طوری که یک طرح برای این حالت در فضای دو بعدی (کانال سیستم مخابراتی، با دو زیر کانال) در شکل (۴) نشان داده شده است [۱۳].

۳-۲- مقایسه روش‌های کنترل توان در مقالات قبل و پیشنهادی

در این مقاله، با بهینه‌کردن مدل برخط و اعمال کران پایین بر روی انرژی ورودی، مانع از سرریز شدن انرژی از باتری و توقف ارسال داده و افزایش نرخ ارسال داده شده که با افزایش میانگین انرژی ورودی، شاهد افزایش نرخ ارسال داده می‌باشیم.

۳-۳- ایجاد یک کران پایین روی توان مصرفی در هر بازه زمانی

در این روش یک کران پایین روی توان ارسال در هر بازه زمانی اعمال شد. با توجه به اینکه در این گونه سیستم‌ها ابتدا انرژی وارد برداشت‌کننده انرژی شده و پس از تبدیل به انرژی الکتریکی، درون باتری ذخیره می‌شود، بنابراین منطقی است که فرض شود میزان انرژی قابل برداشت تا انتهای هر بازه زمانی برای فرستنده دانسته شده‌می‌باشد. با این فرض، کران پایین روی میزان توان ارسال در هر بازه زمانی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.



شکل (۴): روش اولیه بهینه‌سازی محدب برخط [۱۳]



که در آن $P[t] = \sum_{j=1}^k P_j[t]$ و $0 \leq E[t+1] \leq E_{max}$ می‌باشد. به منظور اجرای طرح کنترل توان در الگوریتم پیشنهادی [۱۳]، وضعیت شارژ در بازه زمانی $t+1$ باید محدودیت علیت مصرف انرژی را برآورده نماید.

۳-۴-۲- کران پایین برای متوسط نرخ ارسال داده مورد انتظار در طولانی مدت

باند بالا روی قطر $\mathbb{Q}(D)$ تعریف شده است، به طوری که به ازای هر $x, y \in \mathbb{Q}$ می‌باشد. همچنین باند بالا برای گرادیان $\mathcal{T}_t(P[t]; \delta[t])(G)$ تعریف شده است.

۴- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی الگوریتم ارائه شده، یک سیستم مخابراتی برداشت-کننده انرژی، با دو زیر کانال در نظر گرفته شده که دو کانال دارای محوشدگی با توزیع رایلی و مستقل از یکدیگر هستند. حداکثر توان قابل انتقال توسط فرستنده برابر با ۱۰ در نظر گرفته شده است. در اینجا نتایج شبیه‌سازی به ازای انرژی ورودی یکنواخت مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین متوسط نرخ ارسال داده طولانی مدت مربوط به الگوریتم پیشنهادی به ازای سه توزیع رایلی، برنولی و گوسی مقایسه شده است.

جدول (۲): پارامترهای شبیه‌سازی

Name	Value	Description
k σ_1, σ_2	2 1	Number of sub-channels Rayleigh info of sub-channel
P_{max}	10	maximum transmitting power
E_{max}	$\geq P_{max}$	Battery capacity
$\mathcal{E}[t]$	Uniform, Bernoulli Gaussian	Energy arrival rate

۴-۱- معیارهای ارزیابی

معیارهای ارزیابی شامل موارد زیر است:

- میانگین توان عملیاتی^۱
- P_{max} : حداکثر توان قابل انتقال
- نمودار انرژی E
- نمودار توان-انرژی $E-P$
- عملگر امید ریاضی (\mathbb{E})
- انرژی برداشت شده توسط فرستنده $(\mathcal{E}t)$
- انرژی قابل دسترس درون باتری $(\mathcal{E}t)$

$$\{P \in \mathbb{R}_+^k | 0 \leq (E[t+1] + \mathcal{E}[t+1] - E_{max}) \leq \sum_{j=1}^k P_j\} \quad (8)$$

که در این رابطه $E[t+1]$ و $\mathcal{E}[t+1]$ به ترتیب انرژی درون باتری در ابتدای بازه زمانی $t+1$ و میزان انرژی برداشت شده توسط برداشت‌کننده انرژی تا انتهای بازه زمانی $t+1$ می‌باشد. همچنین E_{max} حداکثر انرژی قابل ذخیره درون باتری می‌باشد. استفاده از این کران پایین در تعیین میزان توان ارسالی در هر بازه زمانی، از سرریز انرژی جلوگیری کرده و باعث بهبود متوسط نرخ ارسال داده طولانی مدت می‌شود. بنابراین مسئله بهینه‌سازی برای به دست آوردن متوسط نرخ ارسال داده به صورت زیر اصلاح می‌شود.

$$\max \mathcal{R}_T = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathcal{T}_t(P[t]; \delta[t]) \quad (9)$$

$$\text{Subject: } \mathbb{Q} = \{P \in \mathbb{R}_+^k | \sum_{j=1}^k P_j \leq P_{max}\}$$

$$\{P \in \mathbb{R}_+^k | 0 \leq (E[t+1] + \mathcal{E}[t+1] - E_{max}) \leq \sum_{j=1}^k P_j\}$$

$$E[t+1] = E[t] + \mathcal{E}[t] - P[t]$$

که در آن $P[t] = \sum_{j=1}^k P_j[t]$ و $0 \leq E[t+1] \leq E_{max}$ می‌باشد. همچنین

$$(E[t+1] + \mathcal{E}[t+1] - E_{max}) \leq \sum_{j=1}^k P_j \quad (10)$$

در صورتی که عنوان قید روی این مسئله بهینه‌سازی اعمال می‌شود که $0 \leq (E[t+1] + \mathcal{E}[t+1] - E_{max})$ باشد.

۳-۴-۲- دو دیدگاه در تجزیه و تحلیل الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت الگوریتم بهینه‌سازی محدب آنلاین پیشنهادی از دو دیدگاه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۳-۴-۱- تضمین در دسترس بودن انرژی

انرژی قابل دسترس در الگوریتم پیشنهادی عبارت از انرژی خورشید، حرارتی، انرژی باد، امواج الکترومغناطیس، سیگنال‌های تداخل، سیگنال‌های تلویزیونی و... می‌باشند. البته میزان انرژی مورد نیاز براساس چارچوب بهینه لیاپانوف در مدل برخط، در هر بازه زمانی جهت انتقال به شرایط فعلی کانال محوشدگی و انرژی قابل دسترس باتری وابسته است. همچنین میزان انرژی قابل دسترس درون باتری در ابتدای بازه زمانی $t+1$ با $E[t+1]$ نشان داده می‌شود که از رابطه زیر بدست می‌آید.

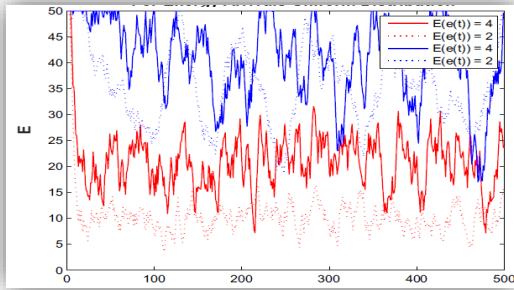
$$E[t+1] = E[t] + \mathcal{E}[t] - P[t] \quad (11)$$

¹ average long-term throughput

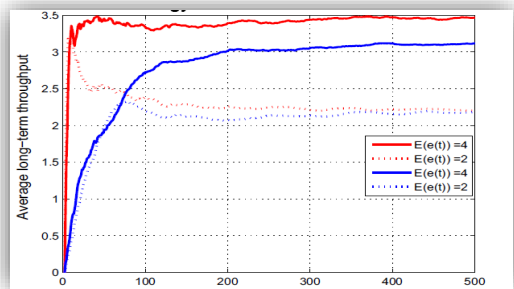


• میزان توان تخصیص داده شده به بازه زمانی t (P_t)

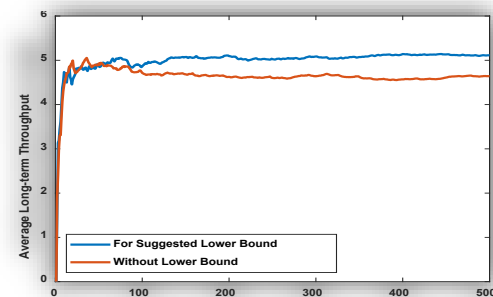
• ظرفیت باتری (E_{max})



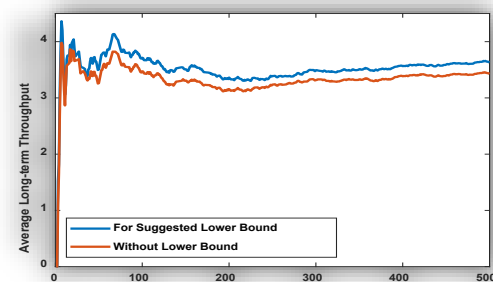
شکل (۵): مقایسه وضعیت انرژی باتری مربوط به [۱۳] و [۱۴].



شکل (۶): مقایسه متوسط نرخ ارسال داده الگوریتم پیشنهادی و [۱۴].



شکل (۷): مقایسه متوسط نرخ ارسال داده الگوریتم پیشنهادی و [۱۳] با توزیع رایلی به ازای $\text{mean}=10$



شکل (۸): مقایسه متوسط نرخ ارسال الگوریتم پیشنهادی و [۱۳] با توزیع برنولی به ازای $\text{mean}=10$.

شکل (۵) الگوریتم ارائه شده در [۱۳] را در مقایسه با الگوریتم ارائه شده در [۱۴] نشان می‌دهد. نمودار خطوط پیوسته و نقطه چین قرمز رنگ مربوط به الگوریتم پیشنهادی [۱۳] و نمودار خطوط پیوسته و نقطه چین آبی رنگ مربوط به [۱۴] است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سطح باتری در الگوریتم‌های دیگر در محدوده وسیع‌تری نوسان می‌کند. الگوریتم پیشنهادی از وضعیت شارژ به عنوان ورودی منفی استفاده می‌کند تا تغییرات وضعیت شارژ را تا حد ممکن کاهش دهد. در الگوریتم‌های مقایسه شده، توان‌های تخصیص داده شده به بردار تفریق شده وابسته هستند که بیشتر تحت تأثیر توزیع کانال قرار می‌گیرد. در نتیجه، خطوط پیوسته آبی و نقطه چین، سطح نوسان مشابهی را هنگامی که توزیع کانال یکسان است، نشان می‌دهند. تغییرات وضعیت شارژ الگوریتم پیشنهادی برای افزایش طول عمر باتری در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر مساعدتر است، زیرا چرخه شارژ و دشارژ عمیق ممکن است طول عمر باتری را کاهش دهد. علاوه بر این، میانگین وضعیت شارژ الگوریتم پیشنهادی کمتر از الگوریتم دیگر است که دلیل اصلی دستیابی به نرخ ارسال داده بالاتر است

در شکل (۶) متوسط نرخ ارسال داده طولانی‌مدت به ازای $\mathbb{E}\{\mathcal{E}[t]\}$ مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد میانگین نرخ برداشت انرژی $\mathbb{E}\{\mathcal{E}[t]\} = 4$ یک مثال از نرخ برداشت انرژی پایین است، در حالی که $\mathbb{E}\{\mathcal{E}[t]\} = 2$ نمونه‌ای از نرخ برداشت انرژی بسیار پایین است. در نمودار خطوط پیوسته و نقطه چین قرمز، نتایج الگوریتم پیشنهادی [۱۳] و خطوط پیوسته و نقطه چین آبی نتایج الگوریتم ارائه شده در [۱۴] است. صرف نظر از میانگین نرخ برداشت انرژی $\mathbb{E}\{\mathcal{E}[t]\}$ ، مشاهده می‌شود که نرخ ارسال داده هر دو الگوریتم با افزایش تعداد بازه‌های زمانی همگرا می‌شود. نمودار نشان می‌دهد که متوسط نرخ ارسال داده الگوریتم [۱۳] بیشتر از الگوریتم دیگر است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی، الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم [۱۳] آورده شده است. در شکل (۷) نتایج مربوط به اعمال کران پایین توان ارسال بر روی متوسط نرخ ارسال داده طولانی‌مدت آورده شده است. یادآوری می‌شود که کران پایین توان ارسال از رابطه زیر به دست می‌آید.

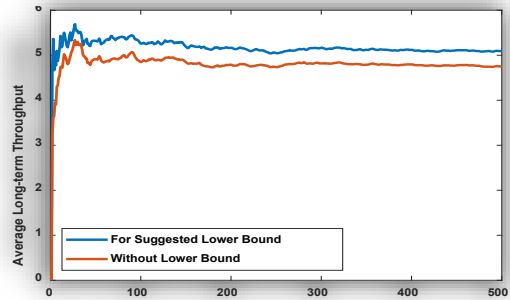
$$\{P \in \mathbb{R}_+^k \mid 0 \leq (E[t+1] + \mathcal{E}[t+1] - E_{max}) \leq \sum_{j=1}^k P_j\} \quad (12)$$

شکل‌های (۸-۱۰) متوسط نرخ ارسال داده طولانی‌مدت به ازای الگوریتم ارائه شده را نشان می‌دهد که نمودار قرمز رنگ مربوط به [۱۳] و نمودار آبی رنگ مربوط به الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. در این نمودارها فرض شده که انرژی ورودی دارای توزیع یکنواخت با میانگین ۱۰ و محوشدگی کانال در شکل (۸) دارای توزیع رایلی، در شکل (۹) توزیع برنولی و در شکل (۱۰) توزیع گوسی باشد.

دست می‌یابد. ظرفیت باتری مورد نیاز کوچک است بنابراین برای گره‌های حسگر بی‌سیم ارزان قیمت، مناسب است. تغییرات وضعیت باتری در شبیه‌سازی‌ها آهسته است که به لحاظ طول عمر باتری مناسب می‌باشد. این مدل تجزیه و تحلیل، مقیاس پذیر است و همچنین برای یک فرستنده که اطلاعات را به چندین گیرنده ارسال می‌کند مناسب است.

مراجع

- [1] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava, "Power management in energy harvesting sensor networks," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 32–es, 2007.
- [2] O. Ozel and S. Ulukus, "Achieving AWGN capacity under stochastic energy harvesting," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, no. 10, pp. 6471–6483, Oct. 2012.
- [3] O. Ozel, K. Tutuncuoglu, J. Yang, S. Ulukus, and A. Yener, "Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: Optimal policies," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, no. 8, pp. 1732–1743, Sep. 2011.
- [4] C. K. Ho and R. Zhang, "Optimal energy allocation for wireless communications with energy harvesting constraints," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 60, no. 9, pp. 4808–4818, Sep. 2012.
- [5] Luo, Y., Lina, P., Zhao, Y., Wang, W., & Yang, Q. "A nonlinear recursive model based optimal transmission scheduling in RF energy harvesting wireless communications". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(5), 3449–3462.2020.
- [6] Dong, M., Li, W., & Amirnavaei, F".Online joint power control for two-hop wireless relay networks with energy harvesting". *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66(2), 463–478.2017.
- [7] Rezaee, M., Mirmohseni, M., Aggarwal, V., & Aref, M. R. "Optimal transmission policies for multi-hop energy harvesting systems". *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2(3), 751–763.2018.
- [8] Baknina, A., & Ulukus, S. "Online scheduling for energy harvesting two-way channels with processing costs". *IEEE Globecom workshops (GC Wkshps)* (pp. 1–6).2016
- [9] O. Ozel, K. Tutuncuoglu, J. Yang, S. Ulukus, and A. Yener, "Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: Optimal policies," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, no. 8, pp. 1732–1743, 2011.
- [10] "Online fixed fraction policies in energy harvesting communication systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 5, pp. 2975–2986, 2018.
- [11] A. Zibacenejad, J. Chen, "The Optimal Power Control Policy for an Energy Harvesting System with Look-Ahead: Bernoulli Energy Arrivals," *IEEE International Symposium on Information Theory*, Paris, France.2019.
- [12] A. Zibacenejad, S. Yang, J. Chen, "On Optimal Power Control Policy for Energy Harvesting Communications with Lookahead," *IEEE International Symposium on Information Theory*, Paris, France.2022.
- [13] Guo, Jing, and Xu Zhang. "Online power control and optimization for energy harvesting communication system based on state of charge." *Wireless Personal Communications*: 1-15. 2022.
- [14] Yu, H., & Neely, M. J. "Learning-aided optimization for energy-harvesting devices with outdated state information". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 27(4), 1501–1514.2019.



شکل (۹): مقایسه متوسط نرخ ارسال الگوریتم پیشنهادی و [۱۳] با توزیع گوسی به ازای $\text{mean}=10$.

همانطور که در نمودار دیده می‌شود استفاده از باند پایین پیشنهاد شده روی میزان توان ارسالی، باعث افزایش متوسط نرخ ارسالی شده است. به این علت سرریز انرژی درون باتری رخ نمی‌دهد و چنانچه انرژی باقی مانده در انتهای هر بازه زمانی بیشتر از حداکثر ظرفیت باتری باشد طرح پیشنهادی حداقل توان ارسالی در آن بازه زمانی را برابر با اختلاف بین انرژی قابل حصول درون باتری و حداکثر ظرفیت باتری قرار می‌دهد و به این ترتیب از سرریز انرژی باتری جلوگیری می‌کند. همان طور که دیده می‌شود نمودار متوسط نرخ ارسال داده طولانی مدت به ازای الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم [۱۳] بهبود قابل توجهی را نشان می‌دهد. میزان بهبود نیز با افزایش میانگین انرژی ورودی افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مسئله کنترل توان در سیستم مخابراتی بی‌سیم مبتنی بر برداشت انرژی با هدف بیشینه کردن نرخ ارسال داده مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین استفاده از بلند پایین روی توان ارسالی باعث افزایش متوسط نرخ ارسال داده شده که علت آن این است که در این حالت، سرریز انرژی درون باتری رخ نمی‌دهد. همچنین از مقایسه بین متوسط نرخ ارسال داده بین الگوریتم [۱۳] و الگوریتم پیشنهادی با استفاده از باند پایین با میانگین ۱۰ به ازای محوشدگی کانال با سه توزیع رابلی، برنولی، گوسی و انرژی ورودی یکنواخت مشاهده شد که نمودار متوسط نرخ ارسال داده طولانی مدت به ازای الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم [۱۳] بهبود یافته و با افزایش میانگین انرژی ورودی بهبود افزایش یافته است. در این روش فرض بر این است که فرستنده هیچ اطلاعاتی در مورد وضعیت کانال محوشدگی و نرخ رسیدن انرژی ندارد. تنظیمات و فرضیات استفاده شده برای شرایط واقعی، معقول است. سیستم مخابراتی مورد نظر دارای یک فرستنده و یک گیرنده است که از طریق کانال نویز گوسی سفید جمع‌شونده دارای محوشدگی به یکدیگر متصل شده اند. همچنین فرض شد که میزان انرژی برداشت شده در طول یک بلوک کد، ثابت و بدون تغییر است و تغییرات از یک بلوک کد به بلوک کد بعدی ثابت در نظر گرفته شده و به عملکرد فوق العاده متوسط نرخ ارسال داده طولانی مدت

