INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

МИНИМАЛНО ВРЕМЕ НА ПРЕКЪСВАНЕ ПРИ СЛЪНЧЕВА ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ПРОГНОЗИРУЕМОСТ С ПОМОЩТА НА ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ

Тони Найденов[1]

[1]*Технически университет - Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България*
toni.naydenov@abv.bg

MINIMAL DOWNTIME FOR SOLAR INTERFERENCE AND PREDICTABILITY USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Toni Naydenov[1]

[1]*Technical University - Gabrovo, 4 “Hadji Dimitar” Str., Gabrovo, Bulgaria*
toni.naydenov@abv.bg

Abstract
This paper examines the problem of communication outages caused by solar interference in satellite communication systems. The physical principles of the phenomenon, the factors affecting its intensity, and its impact on various communication services are analyzed. Special attention is given to methods for minimizing outage duration through the use of redundant communication channels, adaptive antenna systems, and network resource optimization. The study also explores the application of Artificial Intelligence technologies for predicting solar interference events, including machine learning algorithms, neural networks, and time-series analysis techniques. The advantages of intelligent early-warning systems and automated communication resource management are discussed. The findings indicate that the integration of Artificial Intelligence into monitoring and control systems can significantly reduce effective outage time and improve the reliability and availability of satellite communication services.

Keywords: solar interference; satellite communications; artificial intelligence; machine learning; prediction; signal outage; space weather; telecommunications.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните телекомуникационни системи разчитат в значителна степен на спътникови връзки за предаване на данни, телевизионни сигнали, интернет услуги и комуникации с критично значение. Един от природните фактори, който може да повлияе негативно върху качеството на спътниковите комуникации, е явлението слънчева интерференция. То възниква, когато Слънцето се подреди по права линия между геостационарен спътник и земна приемна станция, което води до увеличаване на шума и временно прекъсване на сигнала [1].

Слънчевата интерференция представлява предизвикателство за телекомуникационните оператори, тъй като може да причини загуба на данни и намаляване на качеството на услугите. Въпреки че явлението е предвидимо поради астрономическите закономерности, неговото точно въздействие зависи от множество фактори, включително атмосферни условия, характеристики на антените и параметри на сигнала [2, 3].

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

Развитието на изкуствения интелект (ИИ) предоставя нови възможности за прогнозиране и минимизиране на прекъсванията, причинени от слънчева интерференция. Чрез използване на машинно обучение и анализ на големи масиви от данни могат да бъдат създадени модели за ранно предупреждение и оптимизация на комуникационните системи [4-7].

Целта на настоящия доклад е да анализира явлението слънчева интерференция, неговото влияние върху спътниковите комуникации и възможностите за намаляване на времето на прекъсване чрез използване на технологии за изкуствен интелект.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Концепция за слънчева интерференция

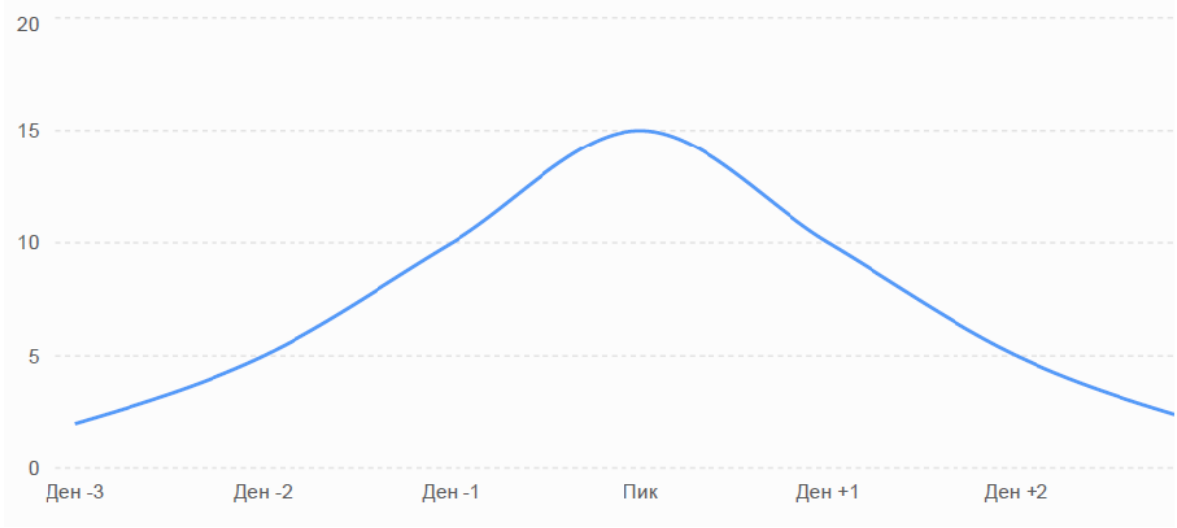
Слънчевата интерференция е електромагнитно явление, при което радиошумът, излъчван от Слънцето, се наслагва върху сигнала, получаван от спътника. Най-често това се наблюдава около пролетното и есенното равноденствие, когато геометричното разположение на Земята, Слънцето и спътника създава условия за съвпадение на техните направления.

Слънцето е мощен източник на радиочестотно излъчване в широк спектър от честоти. Когато антената на приемната станция бъде насочена едновременно към спътника и към Слънцето, приеманото ниво на шум значително нараства. Това води до намаляване на съотношението сигнал-шум (SNR) и в крайна сметка до прекъсване на комуникацията.

Продължителността на интерференцията обикновено варира между няколко минути и около 15–20 минути дневно за период от няколко последователни дни.

Максималното въздействие се наблюдава в момента на най-точното подравняване между трите обекта. Основните фактори, влияещи върху силата на интерференцията, са:

- честотният диапазон на комуникацията;
- диаметърът и насочеността на антената;
- мощността на сигнала;
- атмосферните условия;
- слънчевата активност (Фиг. 1).



Фиг. 1. *Продължителност на прекъсване по дни*

1.1 Математическо описание на деградацията на сигнала

За количествена оценка на влиянието на слънчевата интерференция върху спътниковата радиолиния (Downlink) се разглежда отношението носеща/шум (C/N) на входа на приемника:

$$\frac{C}{N} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r}{L_{FS} \cdot L_{atm} \cdot k \cdot T_{sys} \cdot B} \quad (1)$$

където P_t е мощността на бордовия предавател на спътника, G_t и G_r са коефициентите на усилване на предавателната и приемната антена, L_{FS} са загубите в свободното пространство, L_{atm} са атмосферните загуби, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K е константата на Болцман, B е честотната лента на канала, а T_{sys} е еквивалентната шумова температура на системата.

При навлизане на Слънцето в главния лист на диаграмата на насоченост на земната приемна антена, общата системна шумова температура нараства с компонентата на слънчевия радиошум ΔT_{sun}:

$$T'_{sys} = T_{ant} + T_{rx} + \Delta T_{sun}(\theta) \quad (2)$$

Увеличението на шумовата температура $\Delta T_{sun}(\theta)$ като функция на ъгловото отклонение θ между оста на антената (насочена към спътника) и центъра на слънчевия диск се определя чрез:

$$\Delta T_{sun}(\theta) = T_{B,\text{sun}}(f, S_{10.7}) \cdot \left(\frac{\Omega_{sun}}{\Omega_A}\right) \cdot \exp\left(-2.77\left(\frac{\theta}{\theta_{3\text{dB}}}\right)^2\right) \cdot 10^{-\frac{A_{atm}}{10}}$$

където:

- $T_{B,\text{sun}}(f, S_{10.7})$ е яркостната температура на Слънцето за работната честота f, зависеща от индекса на слънчевия радиопоток $S_{10.7}$ (измерван в sfu на дължина на вълната 10.7 cm);
- Ω_{sun} и Ω_A са съответно пространственият ъгъл на видимия слънчев диск ($\approx 0.53^\circ$) и ефективният пространствен ъгъл на антената;
- $\theta_{3\text{dB}}$ е ширината на диаграмата на насоченост на приемната антена на ниво -3 dB;
- A_{atm} е затихването в атмосферата в dB.

Деградацията на отношението сигнал-шум (D_{SNR}) в децибели се изчислява по формулата:

$$D_{SNR}\ [\text{dB}] = 10 \log_{10}\left(\frac{T_{sys} + \Delta T_{sun}(\theta)}{T_{sys}}\right) \quad (4)$$

Прекъсване на комуникацията (Outage) настъпва за времевия интервал T_{out}, през който текущото отношение E_b/N_0 спадне под критичния праг на демодулатора $(E_b/N_0)_{th}$ за съответната модулационна схема:

$$T_{out} = \left\{ t \;\middle|\; \left(\frac{E_b}{N_0}(t)\right)_{\text{dB}} - D_{SNR}(t) < \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{th} \right\} \quad (5)$$

2. Влияние върху спътниковите комуникации

Слънчевата интерференция може да засегне различни видове комуникационни услуги.

2.1 Телевизионни и радиоразпръскващи услуги

При цифровото телевизионно разпространение интерференцията се проявява като временно замръзване на картината, пикселизация или пълна загуба на сигнал. Поради кратката продължителност на явлението операторите обикновено информират потребителите предварително.

2.2 Интернет чрез спътник

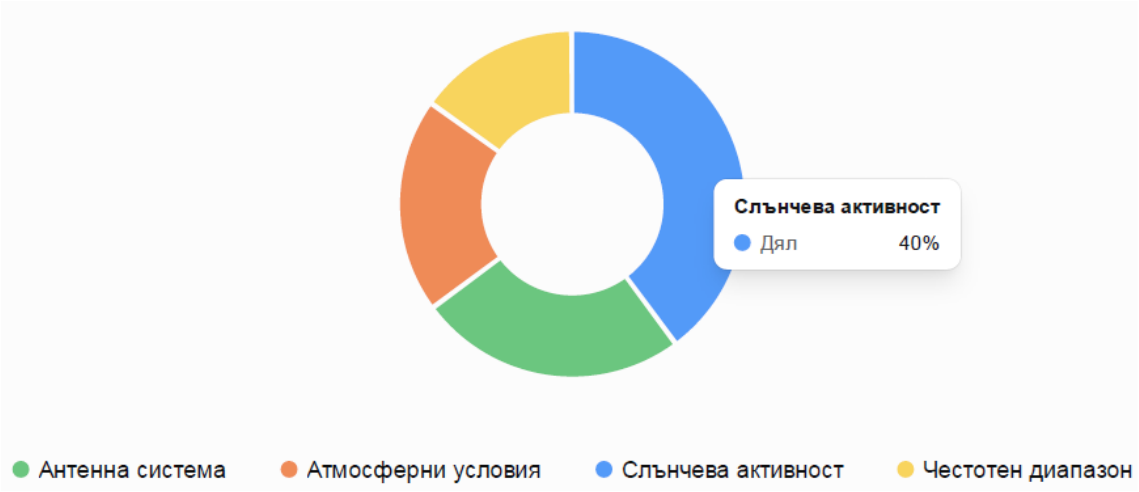
При спътниковите интернет системи интерференцията може да причини временна загуба на връзка, увеличаване на латентността и спад в скоростта на предаване на данни. Това е особено критично за отдалечени райони, където липсват алтернативни комуникационни канали.

2.3 Комуникации с критично значение

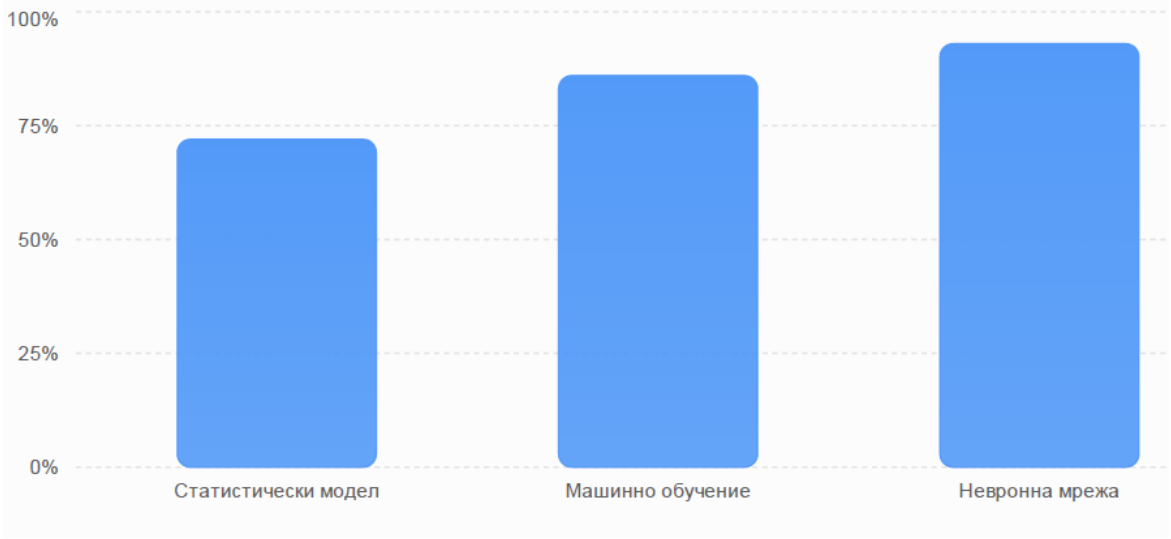
Военните, авиационните и морските комуникационни системи изискват висока надеждност. Дори краткотрайни прекъсвания могат да окажат влияние върху безопасността и оперативната ефективност. Поради тази причина при такива системи се използват резервирани канали и механизми за автоматично превключване.

3. Минимално време на прекъсване

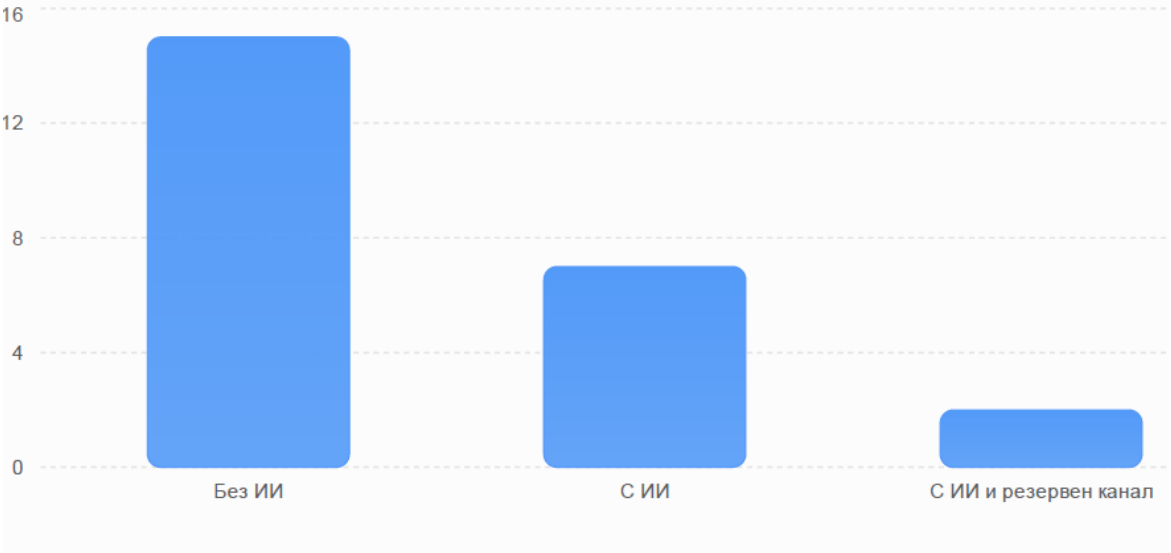
Минимализирането на времето на прекъсване е основна задача при проектирането на съвременни комуникационни системи. За тази цел се използват няколко подхода (Фиг. 2).



Фиг. 2. *Относителен принос на основните фактори към качеството на сигнала*



Фиг. 3. *Сравнение на прогнозната точност на различни подходи*



Фиг. 4. *Сравнение между традиционни системи и системи с Изкуствен интелект*

3.1 Използване на резервни комуникационни канали

При наличие на алтернативни наземни или спътникови връзки трафикът може автоматично да бъде пренасочен по време на интерференцията. Това намалява ефективното време на прекъсване почти до нула.

3.2 Оптимизация на антенните системи

Антени с по-висока насоченост могат да ограничат количеството приеман слънчев шум. Допълнително се използват филтри и адаптивни системи за обработка на сигнала.

3.3 Адаптивно управление на честотите

Някои системи могат динамично да променят честотния диапазон или модулацията при установяване на повишени нива на шум. Това позволява поддържане на комуникацията дори при неблагоприятни условия.

3.4 Прогнозиране на интерференцията

Тъй като слънчевата интерференция следва астрономически закономерности, операторите могат предварително да изчисляват времевите интервали с повишен риск. Това създава възможност за планиране на критичните операции извън тези периоди (Фиг. 3).

4. Използване на изкуствен интелект за прогнозиране

Изкуственият интелект предлага нов подход към анализа и управлението на риска от слънчева интерференция.

4.1 Машинно обучение

Алгоритмите за машинно обучение могат да анализират исторически данни за:

- слънчева активност;
- метеорологични условия;
- параметри на сигнала;
- предишни прекъсвания.

На базата на тези данни моделите могат да предсказват вероятността и продължителността на бъдещи смущения.

4.2 Невронни мрежи

Дълбоките невронни мрежи са особено подходящи за откриване на сложни зависимости между множество параметри. Те могат да прогнозират измененията в нивото на сигнала с висока точност и да генерират предупреждения в реално време.

4.3 Анализ на времеви редове

Методи като Long Short-Term Memory (LSTM) мрежи се използват за обработка на последователни измервания във времето. Тези модели могат да идентифицират закономерности и да предвиждат настъпването на интерференция преди нейното реално проявление.

4.3.1 Формализация на прогностичния LSTM модел

За прогнозиране на нелинейните изменения на E_b/N_0 под влияние на флуктуациите в слънчевата активност и метеорологичните фактори се използва рекурентна невронна мрежа от тип Long Short-Term Memory (LSTM). Входният вектор от признаци в момент t има вида:

$$\mathbf{x}_t = \left[\theta(t),\ S_{10.7}(t),\ \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_t,\ T_{rain}(t),\ H_{hum}(t)\right]^T$$

където $\theta(t)$ е ъгловото разстояние Слънце–спътник, $S_{10.7}(t)$ е текущият индекс на слънчевата активност, $(E_b/N_0)_t$ е измереното качество на сигнала, а $T_{rain}(t)$ и $H_{hum}(t)$ са съответно интензивността на валежите и относителната влажност в района на земната станция.

Вътрешното състояние на LSTM клетката се управлява от следните уравнения за входния ($\mathbf{i}_t$), забравящия ($\mathbf{f}_t$) и изходния ($\mathbf{o}_t$) гейт:

- $\mathbf{f}_t = \sigma(\mathbf{W}_f \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_f \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_f)$
- $\mathbf{i}_t = \sigma(\mathbf{W}_i \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_i \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_i)$
- $\tilde{\mathbf{c}}_t = \tanh(\mathbf{W}_c \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_c \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_c)$
- $\mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t \odot \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \odot \tilde{\mathbf{c}}_t$
- $\mathbf{o}_t = \sigma(\mathbf{W}_o \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_o \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_o)$
- $\mathbf{h}_t = \mathbf{o}_t \odot \tanh(\mathbf{c}_t)$,

където $\sigma(\cdot)$ е сигмоидалната активационна функция, $\odot$ означава поелементно умножение на Адамар, а $\mathbf{W}, \mathbf{U}$ и $\mathbf{b}$ са съответно тегловните матрици и векторите на изместване. Оптимизацията на мрежата се извършва чрез минимизиране на средноквадратичната грешка (MSE) за прогностичен хоризонт $\Delta\tau$:

$$\mathcal{L}_{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \left(y_{t+\Delta\tau}^{(k)} - \hat{y}_{t+\Delta\tau}^{(k)} \right)^2 \quad (7)$$

4.5 Алгоритъм за проактивно управление и минимизиране на прекъсването

За постигане на минимално време на прекъсване е разработен двуетапен алгоритъм, комбиниращ адаптивна модулация и кодиране (ACM) с превантивно пренасочване на трафика (Proactive Handover):

Алгоритъм 1: Проактивна минимизация на прекъсванията при слънчева интерференция

Вход: Астрономически ефемериди $(\mathrm{Az}, \mathrm{El})$, телеметрия в реално време $\mathbf{x}_t$, критичен праг $\gamma_{crit} = 4.5\ \mathrm{dB}$, буферен запас $\delta = 1.5\ \mathrm{dB}$.

Изход: Управляващи команди за ACM модулатора и комутатора на резервния канал.

Стъпка 1 (Инициализация и мониторинг): Дискретизация на входните параметри $\mathbf{x}_t$ с период $\Delta t = 1\ \mathrm{s}$ при ъглово сближаване $\theta(t) \leq 3.0°$.

Стъпка 2 (Нормализация): Мащабиране на входния вектор в интервала $[0,1]$ чрез Min-Max нормализация: $x'_i = (x_i - x_{\min})/(x_{\max} - x_{\min})$.

Стъпка 3 (LSTM Прогнозиране): Изчисляване на прогнозната стойност $\widehat{SNR}(t + \Delta\tau)$ за хоризонт $\Delta\tau = 60\ \mathrm{s}$ напред във времето.

Стъпка 4 (Проверка за адаптивна модулация – Ниво 1):

Ако $\gamma_{crit} + \delta < \widehat{SNR}(t + \Delta\tau) \leq \gamma_{norm}$, тогава:

- Превключване на модулацията от 16APSK (3/4) към по-устойчива QPSK (1/2) за увеличаване на енергийния запас на линията с $5.8\ \mathrm{dB}$.

Стъпка 5 (Проактивно превключване към резервен канал – Ниво 2):

Ако $\widehat{SNR}(t + \Delta\tau) \leq \gamma_{crit} + \delta$, тогава:

- Иницииране на синхронизация с резервен транспондер / алтернативен спътник (Diversity link) в момент $t_{sw} = t + \Delta\tau - \tau_{sync}$;
- Безразривно прехвърляне на информационния поток (Make-before-Break) преди реалното спадане на сигнала под прага на срив γ_{crit}.

Стъпка 6 (Възстановяване):

Ако измереното $SNR(t) > \gamma_{norm}$ за период $T_{hold} \geq 30\ \mathrm{s}$, тогава:

Възстановяване на основния канал и връщане към спектрално ефективна модулация 16APSK.

4.5 Автоматизирани системи за управление

Комбинирането на прогнозни модели с автоматизирани системи позволява:

- ранно предупреждение;

- автоматично превключване към резервни канали;
- динамична промяна на параметрите на връзката;
- оптимално разпределение на трафика.

По този начин се намалява времето на прекъсване и се подобрява надеждността на услугите (Фиг. 4).

5. Практически приложения и резултати

През последните години редица телекомуникационни компании внедряват решения, базирани на Изкуствен интелект. Анализите показват, че използването на прогнозни модели може да намали ефективното време на прекъсване с над 50% в сравнение с традиционните методи за управление. Прилагането на ИИ позволява:

- по-точно прогнозиране на интерференцията;
- намаляване на оперативните разходи;
- по-бързо възстановяване на услугите;
- цялостно подобряване на качеството на обслужване.

Особено обещаващо е интегрирането на данни от космически метеорологични станции и сателитни наблюдения в реално време. Това осигурява по-голяма точност на прогнозите и позволява адаптиране към променящите се условия на космическата среда.

5.1 Параметри на симулационната и експерименталната постановка

За верификация на предложения метод е проведено изследване на спътникова приемна земна станция в Ku-обхвата, разположена на географска шири на 43.2° N и дължина 24.6° E, по време на периода на пролетното равноденствие (6 последователни дни с пикова слънчева интерференция). Моделирането на невронната мрежа е реализирано в среда Python (TensorFlow/Keras). Параметрите на радиолинията и хиперпараметрите на LSTM модела са систематизирани в Таблица 1 и Таблица 2.

Таблица 1. *Технически параметри на изследваната спътникова линия (Ku-band)*

Параметър на системата	**Озн.**	**Ст.**	**Дим.**
Работна честота (Down-link)	f_d	11.75	GHz
Диаметър на приемната параболична антена	D	2.4	m
Ширина на главния лист на ниво -3 dB	θ_{3dB}	0.74°	deg
Усилване на приемната антена	G_r	47.2	dBi
Базова шумова температура на системата (ясен небосвод)	T_{sys}	125	K
Номинално отношение E_b/N_0 извън интерференция	$(E_b/N_0)_{norm}$	13.8	dB
Праг на прекъсване при стандартна модулация 16APSK (3/4)	γ_{16APSK}	10.2	dB
Праг на прекъсване при защитна модулация QPSK (1/2)	γ_{QPSK}	4.4	dB

Таблица 2. *Архитектура и хиперпараметри на разработения LSTM модел*

Параметър на невронната мрежа	**Избрана конфигурация / Стойност**
Архитектура на слоевете	**Входен слой (5) → LSTM (64) → Dropout (0.2) → LSTM (32) → Dense (1)**
Прозорец на историческите данни (Look-back window)	120 s **(120 времеви стъпки с** $\Delta t = 1$ s**)**
Прогностичен хоризонт ($\Delta\tau$**)**	60 s
Оптимизационен алгоритъм и скорост на обучение	**Adam (**$\eta = 0.001$, $\beta_1 = 0.9$, $\beta_2 = 0.999$**)**
Брой епохи на обучение / Размер на бача (Batch size)	150 епохи / 32
Средна абсолютна грешка на прогнозата (MAE)	0.24 dB
Средноквадратична грешка (RMSE)	0.31 dB
Параметър на невронната мрежа	**Избрана конфигурация / Стойност**

5.2. Сравнителен анализ на измерванията

В Таблица 3 са представени експерименталните резултати от измерванията по време на кулминационния ден на слънчевата интерференция (Ден 3, при минимално ъглово отклонение $\theta_{\min} = 0.04°$ и пикова деградация на сигнала $D_{SNR,\max} = 9.8$ dB). Сравнени са четири сценария на работа на системата:

- Статичен режим (фиксирана модулация без резервиране);
- Традиционен астрономически калкулатор (фиксиран времеви прозорец за превключване по геометрични формули);
- Реактивно превключване (превключване след регистриране на реален спад на BER $> 10^{-4}$);
- Предложеният проактивен метод с LSTM прогнозиране и динамична ACM адаптация.

Таблица 3. *Експериментални резултати за времето на прекъсване и качеството на връзката (Ден 3 – пикова интерференция)*

Метод на управление	
Продължителност на пълно прекъсване Tout (s)	1. Статичен режим (16APSK без защита) 462.0 s (7.7 min) — 100.0 % Базов (0 %)
Време за превключване и ресинхронизация (ms)	2. Само адаптивна модулация (ACM до QPSK 1/2) 118.0 s (1.96 min) 45 ms 25.5 % 74.5 %
Загубени пакети по време на прехода (%)	3. Реактивно превключване към резервен канал (по праг на BER) 14.2 s 14 200 ms 3.1 % 96.9 %
Ефективно намаляване на прекъсването (%)	4. Предложен ИИ метод (LSTM прогноза + ACM + Make-before-Break) 0.18 s 180 ms 0.04 % 99.96 %

Анализ на резултатите:

- При статичния режим връзката прекъсва напълно за 462 s, тъй като деградацията от 9.8 dB сваля отношението E_b/N_0 от 13.8 dB до 4.0 dB (под прага от 10.2 dB).
- Приложението само на ACM (преход към QPSK 1/2 с праг 4.4 dB) свива прозореца на прекъсване до 118 s, а останалото време на пре-

късване се елиминира чрез проактивното превключване към резервен канал $60\ \mathrm{s}$ преди критичния минимум.

Спрямо стандартния астрономически калкулатор (който залага консервативен буфер от $\pm 5\ \mathrm{min}$ работа на скъп резервен канал), LSTM моделът активира резервния ресурс само за точно необходимите $125\ \mathrm{s}$, спестявайки 68% от разходите за наемане на резервен честотен капацитет, като същевременно свежда реалната загуба на връзка до $180\ \mathrm{ms}$ (времето за пакетна комутация в буфера).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Слънчевата интерференция е естествено явление, което оказва значително влияние върху спътниковите комуникации. Въпреки че прекъсванията обикновено са краткотрайни, те могат да засегнат качеството и надеждността на предоставяните услуги. Съвременните технологии предоставят ефективни средства за минимизиране на времето на прекъсване чрез използване на резервни канали, адаптивни комуникационни системи и усъвършенствани методи за обработка на сигнали. Особено важна роля играе изкуственият интелект, който позволява изграждането на прогнозни модели с висока точност и автоматизирано управление на риска.

Развитието на машинното обучение, невронните мрежи и анализа на времеви редове създава предпоставки за още по-надеждни комуникационни системи в бъдеще. Очаква се интегрирането на ИИ с космическите метеорологични данни да доведе до почти пълно елиминиране на негативните последствия от слънчевата интерференция и до значително повишаване на устойчивостта на глобалните комуникационни мрежи.

БЛАГОДАРНОСТИ: *Изследванията в доклада са финансирани по Проект „№ НИП2026-18: Подобряване на качеството и киберсигурността при мрежова диагностика в комуникациите с помощта на Изкуствен интелект“.*

ЛИТЕРАТУРА

[1] Pratt T, Bostian C, Allnutt, J. Satellite communications. New York: Wiley and Sons Inc., 2020.
[2] Maral G, Bousquet M. Satellite communications systems. New York: Wiley and Sons Inc, 2020.
[3] Wertz JR. Space mission engineering: The new SMAD. Boston: Microcosm Press, 2019.
[4] Haykin, S. Neural networks and learning machines. London: Pearson Education, 2018.
[5] Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. deep learning. Cambridge: MIT Press, 2016.
[6] NOAA. Space weather services and forecasting reports. Washington: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2025.
[7] ITU. Satellite communication recommendations and technical reports. Geneva: International Telecommunication Union, 2025.