

**Мадінов М.Л.**

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

## ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ РОЗПОВСЮДЖЕННІ СОЛІТОНІВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ

У статті представлено всебічне дослідження балансу між дисперсійними та нелінійними ефектами у волоконно-оптичних системах передачі, зосереджуючись на тому, як ці фактори впливають на стабільність солітону та продуктивність передачі даних. Солітони, які є стабільними хвильовими пакетами, що самопідсилюються, відіграють вирішальну роль у підтримці цілісності даних під час передачі на великі відстані. Дослідження підкреслює важливість управління нелінійними взаємодіями, особливо на високих рівнях потужності або на великих відстанях передачі, для запобігання зіткненням солітонів, тремтіння синхронізації та спектрального розширення.

Обговорюються фундаментальні принципи волоконно-оптичної передачі, порівнюючи її з традиційною мідною проводкою, підкреслюючи переваги оптичних волокон у спрямуванні світлових імпульсів уздовж визначених шляхів для ефективного передачі даних. У міру того, як швидкість передачі даних зростає, а майбутні прогнози досягають 400 Тбіт/с або навіть 5–100 Пбіт/с за допомогою методів просторового мультиплексування, розуміння та контроль нелінійних ефектів стає важливим для оптимізації продуктивності. Нелінійні явища, такі як спричинена Керром самофазова модуляція (SPM), крос-фазова модуляція та чотирихвильове змішування, є критичними факторами, які впливають на поведінку солітонів і цілісність сигналу.

Дослідження включає в себе різні системні параметри, включаючи бітрейт, пропускну здатність і просторові властивості оптичних волокон, щоб оцінити ефективність передачі солітонів. Це підкреслює важливість збалансування нелінійних змін показника заломлення з хроматичною дисперсією для забезпечення мінімального спотворення сигналу. Продуктивність системи оцінюється через спектральну ефективність ( $\gamma_{agr}$ ) і пропускну здатність, які безпосередньо пов'язані з динамікою солітонного імпульсу. Удосконалені методи мультиплексування, такі як мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) і мультиплексування з просторовим розподілом (SDM), досліджуються на предмет їхньої ролі у збільшенні загальної пропускну здатності шляхом передачі кількох потоків даних одночасно.

Описано нелінійне рівняння Шредінгера (NLSE), яке керує розповсюдженням солітонів, ілюструючи, як баланс між дисперсією та нелінійними ефектами впливає на стабільність солітонів. У ньому розглядається, як нелінійні фазові зсуви, що є наслідком SPM, і спектральне розширення впливають на поширення солітонів. Дослідження далі вивчає нелінійні механізми посилення та втрати, такі як вимушене комбінаційне розсіювання, які сприяють еволюції солітонів.

**Ключові слова:** солітон, оптичне волокно, передача, сигнал, нелінійний ефект, стабільність.

**Постановка проблеми.** Сигнали, що передаються в оптичних волокнах, можуть призвести до нелінійних ефектів через непружні зіткнення. Залежно від оптичної інтенсивності можуть виникнути два різні нелінійні ефекти: вимушене комбінаційне розсіювання та вимушене розсіювання Бріллюена. Обидва ці нелінійні ефекти залежать від інтенсивності, але поріг оптичної інтенсивності для вимушеного бріллюенівського розсіювання значно нижчий порівняно з комбінаційним розсіюванням. Навіть на нижчих рівнях потужності бріллюенівське розсіювання може відбуватися спонтанно, оскільки воно обумовлене розсіюванням фонів, що утворюються термічно. Вища вхідна оптична потужність призвод-

ить до генерації великої кількості фонів, і коли дві зустрічні оптичні хвилі у волокні перетинаються, вони створюють рухому решітку показника заломлення. Чим більша відбита оптична сила, тим міцніша решітка, що призводить до вищої ефективної відбивної здатності. Коли падаюча оптична потужність перевищує певний поріг, стимульовані фони Бріллюена можуть розсіювати значну частину падаючої оптичної потужності назад до вхідного кінця оптичного волокна. Для кремнеземних оптичних волокон сам матеріал виявляє відносно слабкі нелінійні ефекти, але поєднання малої ефективної площі моди та великої довжини розповсюдження в оптичному волокні значно посилює ці нелінійні ефекти.

Солітони являють собою унікальний клас оптичних імпульсів, які зберігають свою форму та швидкість, коли вони поширюються через нелінійне середовище, яким є оптичні волокна. У волоконно-оптичних системах передачі солітони виникають завдяки точному балансу між двома протилежними ефектами: дисперсією, яка має тенденцію розширювати імпульс, і нелінійністю Керра, яка його стискає. Ця рівновага дозволяє солітонам проходити великі відстані, не зазнаючи типових спотворень і деградації стандартних оптичних імпульсів.

Нелінійні ефекти у волоконній оптиці, особливо викликані ефектом Керра, відіграють центральну роль у динаміці солітонів. Ефект Керра викликає зміну показника заломлення волокна пропорційно інтенсивності світла, що проходить через нього. Це призводить до самофазової модуляції (self-phase modulation – SPM), де фаза солітонного імпульсу змінюється відповідно до його власної інтенсивності. У випадку кількох солітонів, що поширюються одночасно, виникає перехресна фазова модуляція (cross-phase modulation – XPM), коли на фазу одного солітону впливає присутність інших. Крім того, чотирихвильове змішування (FWM), інший нелінійний ефект, може генерувати нові частотні компоненти, ще більше ускладнюючи процес передачі сигналу.

У системах на основі солітонів керування цими нелійними взаємодіями має вирішальне значення для мінімізації спотворення сигналу та підтримки стабільності імпульсів солітонів. Такі методи, як керування дисперсією, яке передбачає чергування сегментів волокна з різними дисперсійними властивостями, допомагають контролювати поширення солітонів на великі відстані, забезпечуючи вищу точність передачі.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У науково-дослідницькому просторі сьогодення з'являються роботи, присвячені досліджуваній проблематиці. Зокрема, у роботі [1] був представлений модифікований розширений прямий алгебраїчний метод (Modified Extended Direct Algebraic Method – MEDAM), який пропонує структурований підхід до розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних (nonlinear partial differential equation – NLPDE) шляхом перетворення їх у звичайні диференціальні рівняння (ordinary differential equations – ODE). Спочатку MEDAM застосовує хвильове перетворення, щоб спростити NLPDE в ODE. Це перетворення передбачає вираження залежної змінної через хвильову функцію та нову координату. Отримане ODE потім

аналізується шляхом представлення його рішення у вигляді ряду, де коефіцієнти ряду визначаються за допомогою правил балансування, застосованих до ODE.

Крім того, метод включає розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, отриманих шляхом підстановки представлення ряду назад в ODE. Для отримання точних результатів на цьому етапі часто потрібні обчислювальні інструменти, такі як Mathematica. Змінюючи параметри в цих рівняннях, MEDAM створює конкретні рішення, включаючи яскраві солітони та періодичні рішення, які ілюструють універсальність методу в обробці різних типів нелінійних явищ.

У практичних застосуваннях, таких як дробові похідні або конкретні фізичні моделі, MEDAM демонструє свою ефективність, перетворюючи складні NLPDE у простіші форми. Це перетворення досягається за допомогою стратегічних перетворень і замінів, що дозволяє отримати значущі рішення, які відповідають умовам початкової проблеми.

Робота [2] зосереджується на дослідженні хаотичної динаміки та стійкості у збуденій динамічній системі з використанням як аналітичних, так і чисельних методів. Дослідження починається з перетворення керівних диференціальних рівнянь у динамічну систему та включення збудень для дослідження потенційної хаотичної поведінки. Двовимірні фазові діаграми збуденої системи аналізуються зі зміною параметрів збудення, виявляючи, як різна інтенсивність збудення впливає на динаміку системи.

Щоб оцінити стабільність системи, проводиться аналіз чутливості шляхом вивчення реакції системи на зміни початкових умов і значень параметрів. Цей аналіз, підкріплений графічними зображеннями, демонструє, як незначні коригування початкових умов призводять до розбіжних траєкторій, підкреслюючи чутливість системи та вказуючи на зони потенційної нестабільності.

У статті використовуються математичні методи, включаючи  $f + (G'/G)$  – метод розширення, щоб отримати та візуалізувати рішення оптичних солітонів. Результати демонструють різні типи солітонів, у тому числі періодичні, темні, кінк-хвилі та хвилі проти кінків, із детальною візуалізацією, наданою для різних налаштувань параметрів [2].

Дослідження роботи [3] забезпечує огляд оптичних солітонних рішень комплексно модифікованої моделі Чен-Лі-Лю (Chen-Lee-Liu – CLL). Використовується узагальнений метод

( $G/G\phi$ )-розкладання для отримання та дослідження різноманітних солітонних рішень, включаючи періодичні, сингулярні та компактні форми. Перший сегмент аналізу зосереджений на отриманні явних солітонних рішень за різних обмежень параметрів. Маніпуляція параметрами  $q$  і  $r$  дозволяє досліджувати сценарії, де ці параметри дорівнюють нулю або не дорівнюють нулю, що призводить до рішень, які описуються гіперболічними, тригонометричними та іншими функціональними формами.

Друга частина дослідження зосереджена на фізичній інтерпретації та наслідках цих рішень. За допомогою програмного забезпечення Mathematica, генеруються детальні тривимірні та двовимірні графічні представлення солітонних рішень, які з'ясовують динамічну поведінку цих рішень у діапазоні значень дробових параметрів і часових змін. Графічні результати надають візуальне уявлення про те, як профілі солітонів змінюються з часом, висвітлюючи періодичні, дзвоноподібні та сингулярні періодичні форми.

Необхідно зауважити, що, окрім висвітлених робіт, Крім того, варто зазначити праці наступних науковців: П. Еллапан, М. Аннамалай, Р. Равічандран [4], П. Гао, Б. Сунь, Дж. Лю [5], Ф. Бадшах, К. Тарік, М. Інк, М. Аслам, М. Зішан [6], А. Халіфа, А. Ахмед, Н. Бадра, Х. Ахмед, М. Мірзазаде, М. Хашемі, М. Байрам [7], К. Окамото [8], М. Бабер, М. Ясін, Н. Ахмед, С. Алі, М. Алі [9], Х. Кемпф, М. Хагнер, П. Зульцер, К. Рік, А. Лейтенсторфер [10], Е. Аслан, Д. Деніз, М. Інк [11], А. Сечер, І. Ондер, Х. Есен, Н. Оздемір, М. Чинар, Х. Чакіджіоглу, С. Дурмус, М. Озісік, М. Байрам [12], М. Мурад, Х. Ісмаель, Т. Сулейман А. [13], М. Ікбал, Ст. Фаріді, Р. Алі, А. Сідаві, А. Раджі, А. Анкі, А. Духдух, С. Аламрі [14], М. Ахмед, А. Арнус, К. Гепріл, А. Сесер [15] тощо.

Разом з цим, враховуючи складність феномену поширення солітонів у волоконно-оптичних системах передачі можна констатувати, що не всі аспекти цієї наукової проблематики вивчено та висвітлено у наукових працях. Зокрема, питання, пов'язане з дослідженням нелінійних ефектів, які виникають при розповсюдженні солітонів в волоконно-оптичних системах передачі, станом на теперішній час залишається недостатньо дослідженим та потребує подальших розвідок у цьому напрямі.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження нелінійних ефектів, що виникають при розповсюдженні солітонів в волоконно-оптичних системах передачі.

**Викладення основного матеріалу.** Баланс між дисперсійним і нелінійним ефектами гарантує, що солітони залишаються стабільними, але при високій потужності передачі або на великих відстанях нелінійні взаємодії можуть призвести до зіткнень солітонів, тремтіння синхронізації та спектрального розширення. Цими ефектами необхідно ретельно керувати, часто за допомогою методів керування дисперсією, щоб підтримувати цілісність солітонної передачі. Управління цими нелінійностями має вирішальне значення для підтримки високих швидкостей передачі даних у сучасних системах оптичного зв'язку, особливо тому, що методи мультиплексування та просторовий паралелізм розширюють межі пропускної здатності оптоволоконна.

Волоконно-оптичні системи передачі покладаються на особливості оптичних волокон як контрольного середовища для передачі даних. На відміну від традиційної мідної проводки, оптичні волокна направляють світлові імпульси, забезпечуючи ефективну передачу даних за визначеними шляхами. Оскільки швидкість передачі продовжує зростати, а майбутні прогнози передбачають швидкість передачі даних до 400 Тбіт/с або навіть до 5–100 Пбіт/с за допомогою методів просторового мультиплексування, розуміння нелінійних ефектів і керування ними є життєво важливим для оптимізації продуктивності.

Нелінійні ефекти відіграють вирішальну роль у поширенні солітонів у волоконно-оптичних системах передачі, які використовують світлові імпульси для передачі даних на великі відстані. У цьому контексті солітони є стабільними хвильовими пакетами, що самопідсилюються, які зберігають свою форму під час передачі завдяки балансу між дисперсією та нелінійними ефектами в оптичному волокні. Цей баланс є ключовим для забезпечення високошвидкісної передачі даних без погіршення сигналу, яке зазвичай викликається дисперсією в звичайних оптоволоконних системах. Ці нелінійні ефекти включають спричинену Керром самофазову модуляцію, перехресну фазову модуляцію та чотирихвильове змішування, усі вони впливають на поведінку

Ефективність передачі солітонів регулюється взаємодією різних системних параметрів, таких як бітрейту  $V$ , пропускної здатності  $B$  і просторових властивостей оптичного волокна, включаючи діаметр серцевини  $D_{OF}$ . Підтримуючи баланс між нелінійною зміною показника заломлення та хроматичною дисперсією, солітони можуть подолати величезні відстані з мінімальним

спотворенням сигналу. Загальна продуктивність системи оцінюється за допомогою спектральної ефективності,  $\gamma_{agr}$  та пропускної здатності, які безпосередньо пов'язані з динамікою солітонного імпульсу. У сучасних волоконно-оптичних системах такі методи паралельної передачі, як мультиплексування за довжиною хвилі (wavelength-division multiplexing – WDM) і мультиплексування з просторовим розділенням (spatial-division multiplexing – SDM), дозволяють передавати кілька потоків даних одночасно, підвищуючи загальну пропускну здатність. Впровадження SDM, наприклад, є стратегією збільшення кількості просторових каналів, збільшення кількості солітонних потоків, що передаються через різні ядра чи режими волокна. Це збільшує сукупну спектральну ефективність системи, яка визначається як:

$$\gamma_{agr} = \gamma \times P_{spat} \quad (1)$$

де  $\gamma$  – спектральна ефективність на канал, а  $P_{spat}$  – коефіцієнт просторового мультиплексування. Тоді загальна пропускна здатність  $V_{OF}$  є функцією як спектральної ефективності, так і просторового паралелізму:

$$V_{OF} = F_{ct} \times \gamma_{agr} \times m \times \mu \times \psi \quad (2)$$

де  $F_{ct}$  представляє інтервал частот каналу,  $m$  – кількість спектральних каналів,  $\mu$  – просторові моди та  $\psi$  – кількість ядер. Це формулювання ілюструє, як нелінійні ефекти впливають на динаміку солітонів у волокну та як передові методи мультиплексування можуть пом'якшити їхній вплив для підвищення швидкості передачі даних.

Нелінійне рівняння Шредінгера (nonlinear Schrödinger equation – NLSE) керує поширенням солітонів в оптичних волокнах, описуючи, як змінюється складна огинаюча електричного поля  $A(z, t)$  імпульсу під час його проходження волокном:

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} = i\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t) \quad (3)$$

$A(z, t)$  відповідає амплітуді імпульсу в положенні  $z$  і часі  $t$ ,  $\beta_2$  – коефіцієнт дисперсії групової швидкості (group velocity dispersion – GVD),  $\gamma$  – нелінійний коефіцієнт, який залежить від показника заломлення волокна та ефективної площі моди, який визначений як:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}} \quad (4)$$

$n_2$  – нелінійний коефіцієнт заломлення матеріалу волокна,  $A_{eff}$  – ефективна зона режиму.

Баланс між дисперсійним членом  $\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2}$  і нелінійним членом  $i\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t)$  відповідає

за утворення та поширення солітонів. Нелінійний зсув фази, який відчуває імпульс через ефект Керра, спричиняє самофазову модуляцію (SPM), тоді як дисперсія призводить до розширення імпульсу. Для солітонів ці два ефекти компенсуються, що призводить до стабільного поширення імпульсу без значних спотворень.

Солітонний порядок, який є мірою відносної сили нелінійності та дисперсії, визначається як:

$$N = \sqrt{\frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|}} \quad (5)$$

$P_0$  – пікова потужність імпульсу,  $T_0$  – ширина імпульсу на половині максимуму,  $\beta_2$  – коефіцієнт GVD.

Для базових солітонів ( $N = 1$ ) імпульс зберігає свою форму під час поширення. Солітони вищого порядку (тобто  $N > 1$ ) виявляють періодичні коливання у формі та спектрі під час їх поширення.

Ефект самофазової модуляції (self-phase modulation – SPM), викликаний нелінійним показником заломлення волокна, призводить до зсуву частоти солітону, подібного до зсуву частоти Бріллюена. Зсув можна описати як функцію інтенсивності солітону та нелінійного накопичення фази. Для солітону нелінійний фазовий зсув пропорційний його інтенсивності і може бути виражений як:

$$\Delta\phi_{SPM} = \gamma P_0 L_{eff} \quad (6)$$

де  $L_{eff}$  відповідає ефективній довжині волокна:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (7)$$

$\alpha$  – коефіцієнт загасання волокна,  $L$  – загальна довжина волокна. Нелінійний зсув фази, спричинений SPM, призводить до спектрального розширення солітонного імпульсу, що може впливати на стабільність імпульсу за певних умов.

Нелінійні механізми підсилення та втрат, такі як комбінаційне розсіювання та розсіювання Бріллюена, також сприяють еволюції солітонів у волокну. Комбінаційне розсіювання передає енергію від височастотних компонентів солітону до низькочастотних компонентів, що призводить до зсуву центральної частоти солітону вниз. Швидкість цього зсуву можна приблизно визначити таким чином:

$$d\lambda \approx -\frac{16\pi^3 n^2 P_0 T_0}{3\lambda_0^2 c A_{eff}} \quad (8)$$

де  $c$  – швидкість світла,  $\lambda_0$  – центральна довжина хвилі, а  $z$  – відстань поширення. Цей зсув вниз, відомий як Раманівський зсув власної частоти, впливає на поширення солітонів на великі відстані.

**Висновки.** Дослідження демонструє, що ефективне управління взаємодією між дисперсією та нелінійними ефектами має важливе значення для оптимізації волоконно-оптичних систем передачі. Дослідження показує, що стабільність солітонів і цілісність даних тісно пов'язані з балансом між хроматичною дисперсією та нелінійними взаємодіями, такими як самофазова модуляція та чотирьоххвильове змішування. Аналізуючи ключові параметри системи та використовуючи передові методи мультиплексування, дослідження підкреслює, як точний контроль над цими факторами може підвищити загальну продуктивність сигналу та пропускну здатність.

Дослідження можливостей високошвидкісної передачі даних у поєднанні із застосуванням складних методів, таких як мультиплексування за довжиною хвилі та просторовим розподілом, під-

креслює потенціал для досягнення безпрецедентної пропускну здатності та ефективності оптичних комунікаційних мереж. Отримані результати дозволяють глибше зрозуміти роль нелінійного рівняння Шредінгера в розповсюдженні солітонів, підкреслюючи важливість керування нелінійними фазовими зрушеннями та спектральним розширенням для підтримки якості сигналу.

Підводячи підсумок, стаття підкреслює критичну потребу в ефективних стратегіях управління дисперсією для збереження цілісності солітонів і оптимізації високошвидкісної передачі даних у сучасних волоконно-оптичних системах. Він надає цінну інформацію про те, як передові методи мультиплексування та точний контроль нелінійних ефектів можуть підвищити продуктивність і пропускну здатність оптичних комунікаційних мереж.

#### Список літератури:

1. Highly dispersive gap solitons for conformable fractional model in optical fibers with dispersive reflectivity solutions using the modified extended direct algebraic method / Soliman M., Ahmed H., Badra N., Nofal T., Samir I. *AIMS Mathematics*. 2024. № 9. DOI:10.3934/math.20241229.
2. Shakeel M., Liu X., Alshammari F. Exploring the Depths: Soliton Solutions, Chaotic Analysis, and Sensitivity Analysis in Nonlinear Optical Fibers. *Fractal and Fractional*. 2024. № 8. 317 p. DOI:10.3390/fractalfrac8060317.
3. Assorted optical soliton solutions of the nonlinear fractional model in optical fibers possessing beta derivative. Islam M., Amin Md., Akbar Ali Md., Wazwaz A.-M., Osman M. *Physica Scripta*. 2023. № 99. 015227 p. DOI:10.1088/1402-4896/ad1455.
4. Ellappan P., Annamalai M., Ravichandran R. Dynamics of switching optical soliton in fiber with sixth order dispersion and inter modal dispersion. *Physica Scripta*. 2024. № 99. DOI:10.1088/1402-4896/ad4d20.
5. Gao P., Sun B., Liu J. Nonlinear Faraday magneto-optic effects in a helically wound optical fiber. 13 Jul. 2024. DOI:10.48550/arXiv.2407.09805.
6. On the study of bright, dark and optical wave structures for the coupled fractional nonlinear Schrödinger equations in plasma physics. Badshah F., Tariq K., Inc M., Aslam M., Zeeshan M. *Optical and Quantum Electronics*. 2023. № 55. DOI:10.1007/s11082-023-05434-z.
7. Discovering novel optical solitons of two CNLSEs with coherent and incoherent nonlinear coupling in birefringent optical fibers. Khalifa A., Ahmed A., Badra N., Ahmed H., Mirzazadeh M., Hashemi M., Bayram M. *Optical and Quantum Electronics*. 2024. № 56. DOI:10.1007/s11082-024-07237-2.
8. Okamoto K. Nonlinear Optical Effects in Optical Fibers. 2022. P. 219-269. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815601-8.50005-7>.
9. Dynamical analysis and optical soliton wave profiles to GRIN multimode optical fiber under the effect of noise / Baber M., Yasin M., Ahmed N., Ali S., Ali M. *Nonlinear Dynamics*. 2024. P. 1-16. DOI:10.1007/s11071-024-10075-2.
10. An optical fiber integrated device for nonlinear generation of femtosecond mid-infrared pulses. Kempf H., Hagner M., Sulzer P., Riek C., Leitenstorfer A. *Applied Physics Letters*. 2024. № 124. DOI:10.1063/5.0208093.
11. Aslan E., Deniz D., Inc M. Multiwaves and optical soliton solutions with the concatenation model in the optical fibers. *Optical and Quantum Electronics*. 2024. № 56. DOI:10.1007/s11082-024-07356-w.
12. On Stochastic Pure-Cubic Optical Soliton Solutions of Nonlinear Schrödinger Equation Having Power Law of Self-Phase Modulation. Secer A., Onder I., Esen H., Özdemir N., Cinar M., Cakicioglu H., Durmus S., Ozisik M., Bayram M. *International Journal of Theoretical Physics*. 2024. № 63. DOI:10.1007/s10773-024-05756-y.
13. Murad M. A., Ismael H., Sulaiman T. A. Resonant optical soliton solutions for time-fractional nonlinear Schrödinger equation in optical fibers. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*. 2024. DOI:10.1142/S0218863524500243.
14. Dynamical study of optical soliton structure to the nonlinear Landau–Ginzburg–Higgs equation through computational simulation. Iqbal M., Faridi W., Ali R., Seadawy A., Rajhi A., Anqi A., Duhduh A., Alamri S. *Optical and Quantum Electronics*. 2024. № 56. 1192 p. DOI:10.1007/s11082-024-06401-y.

15. Analyzing the influence of multiplicative white noise on optical solitons in birefringent fibers through the perturbed Gerdjikov–Ivanov model / Ahmed M., Arnous A., Gepreel K., Secer A. *Optical and Quantum Electronics*. 2024. № 56. DOI:10.1007/s11082-024-07329-z.

### **Madinov M.L. STUDY OF NONLINEAR EFFECTS OF THE PROPAGATION OF SOLITONS IN FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS**

*The article provides a comprehensive examination of the balance between dispersion and nonlinear effects in fiber-optic transmission systems, focusing on how these factors impact soliton stability and data transmission performance. Solitons, which are stable wave packets that self-reinforce, play a crucial role in maintaining data integrity during transmission over long distances. The study highlights the significance of managing nonlinear interactions, particularly at high power levels or over extensive transmission distances, to prevent soliton collisions, synchronization jitter, and spectral broadening.*

*The article discusses the fundamental principles of fiber-optic transmission, contrasting it with traditional copper wiring by emphasizing the advantages of optical fibers in guiding light pulses along defined paths for efficient data transfer. Nonlinear phenomena such as Kerr-induced self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation, and four-wave mixing are critical factors that affect soliton behavior and signal integrity.*

*The study incorporates various system parameters, including bit rate, bandwidth, and spatial properties of optical fibers, to assess soliton transmission efficiency. It underscores the importance of balancing nonlinear changes in the refractive index with chromatic dispersion to ensure minimal signal distortion. The performance of the system is evaluated through spectral efficiency and bandwidth, which are directly related to soliton pulse dynamics. Advanced multiplexing methods, such as wavelength-division multiplexing (WDM) and spatial-division multiplexing (SDM), are explored for their role in enhancing overall bandwidth by transmitting multiple data streams simultaneously.*

*The article also details the nonlinear Schrödinger equation (NLSE) that governs soliton propagation, illustrating how the balance between dispersion and nonlinear effects influences soliton stability. It addresses how nonlinear phase shifts, resulting from SPM, and spectral broadening affect soliton propagation. The study further examines nonlinear mechanisms of amplification and loss, such as stimulated Raman scattering, which contribute to soliton evolution.*

**Key words:** *soliton, optical fiber, transmission, signal, nonlinear effect, stability.*