

OPTIČKI SOLITONI I MOGUĆE PRIMENE

Andrija Kunarac, dipl.inž.

1. UVOD

Postoje prirodni fenomeni čiji je značaj podjednako fascinantan kao i postupak kojim su otkriveni. Jedan od tih fenomena su i solitoni. To su talasi koji se javljaju i u mehaničkom i u elektromagnetskom (optičkom) obliku i koji imaju takve osobine koje im otvaraju izvanredne mogućnosti za primene u telekomunikacijama.

Solitone je prvi uočio izvesni J.S.Russel. Ovaj naučnik je imao izvanrednu moć zapažanja. Jašući pored kanala kojim plove barže i prenose robu, uočio je sledeće: Kada se barža naglo zaustavi, ispred nje se javlja veliko, usamljeno vodeno uzvišenje, savršenog glatkog oblika, koje se prostire konstantnom brzinom. To je bio solitonski talas. Takođe ni oblik i amplituda se nisu menjali.

Dakle, koncept solitona dolazi iz opisa pojedinačnog vodenog talasa objavljenog od strane J.S.Russel-a 1834. godine. Od tada, ovaj fenomen privlači veliku pažnju mnogih matematičara i fizičara, pa su 1895. godine, Korteweg i de Vries pronašli nelinearnu jednačinu čije rešenje je soliton. Od početka laserske fizike, zbog strašno velikih veličina polja, interakcija između lasera i materijala je morala biti opisana nelinearnim jednačinama, i to je dalo važnost nelinearnoj fizici. U 1960. godini, matematičari Zabusky i Kruskal napravili su glavni matematički uslov, tzv. inverzni metod rasejanja (IST), za dobijanje analitičkog rešenja i nazvali ga soliton.

Ovo je vrlo atraktivna teorija jer nije ista kao klasična teorija perturbacija. Ona daje ukupan razvoj talasa, a ne samo lokalno ponašanje. Posle toga, koncept solitona je bio sve šire i šire korišćen u mnogim oblastima i razvijan u različitim disciplinama. Zavisnost od nelinearnog efekta duž jednog pravca sažete fizičke materije je ispravan način za objašnjenje strukturnog faznog prelaza u izvesnim kristalima. Takođe, to je dalo rođenje nove discipline koja je koncentrisana na nelinearne materijale.

U kompetentnim naučnim krugovima, nelinearni fenomeni i haotično ponašanje dinamičkog sistema privlače pažnju fizičara, matematičara i inženjera. Soliton je čudno ponašanje propagacionih talasa, pa postaje fokus interesovanja.

2. SOLITONSKI PRENOS I MEHANIZMI ZA GENERISANJE OPTIČKIH SOLITONA

Soliton je impuls koji se karakteristiše time da se njegov oblik ne menja u prostiranju kroz određenu sredinu. Sredina u kojoj može opstati soliton mora biti takva da se nelinearnost i disperzivnost sredine međusobno kompenzuju. Monomodno vlakno sa negativnom disperzijom grupne brzine predstavlja jednu takvu sredinu pod uslovom da se u vlaknu prostire impuls dovoljnog intenziteta da bi nelinearne karakteristike vlakna došle do izražaja. Iz teorije prostiranja optičkih impulsa kroz vlakno dobro je poznato da na njegov oblik utiče disperzija grupne brzine koja potiče od disperzije

materijala i talasovodne disperzije. Negativna disperzija grupne brzine znači da se komponente viših frekvencija u spektru impulsa brže prostiru od komponenti nižih frekvencija. Nelinearna karakteristika vlakna javiće se pri dovoljnim intenzitetima polja. Znamo da je najveća gustina snage u centru jezgra i da opada prema omotaču. Tamo gde je intenzitet polja najveći, indeks prelamanja je najveći. Ovo ponašanje je poznato kao Kerr-ov efekat. Rezultat ove pojave je zavisnost brzine prostiranja od nivoa signala, usled čega dolazi do trenutne promene faze u zavisnosti od nivoa koja se manifestuje kao autofazna modulacija impulsa. Kada se izbalansiraju efekti negativne disperzije grupne brzine i autofazne modulacije usled Kerr-ovog efekta dobija se impuls koji ne menja oblik tokom prostiranja.

Postoji nekoliko vrsta mehanizama za generisanje optičkih solitona. Prvi uspešan eksperiment je bio model dvošupljinskog lasera objavljen 1984. godine. Tokom 1987. godine, Berg i Christiansen predložili su prvi teoretski model za solitonski laser; oni koriste Maxwell-Bloch-ovu jednačinu da opišu glavnu šupljinu, nelinearnu Schrödinger-ovu jednačinu (NLSE) za opis šupljine vlakna. Znamo da je efekat solitona zavisn od postojanja disperzije grupne brzine i nelinearnog efekta, pa je glavni problem u solitonskom laseru nalaženje odgovarajućeg načina za korišćenje nelinearnih materijala. Kasnije je pokazano da skoro svi optički nelinearni efekti imaju dovoljnu sposobnost da generišu solitone. Prostorni solitoni mogu se prenositi optičkim nelinearnim medijumom koji ima Kerr-ov efekat i tada nelinearni efekti medija mogu egzaktno kompenzovati linearni difrakcioni efekat. Takođe, možemo koristiti magneto-optičke efekte tako da možemo kontrolisati interakciju između dva različita impulsa, i foto-refraktivne efekte koji mogu držati prostorni soliton u kristalu.

3. JEDNAČINA ZA REŠAVANJE SOLITONA

Matematička tehnika za analitičko rešavanje solitona je inverzni metod rasejanja, što znači da moramo dobiti kako izgleda početni potencijal ako samo znamo koje je rasejanje spektra i energija vezanog stanja. U čistoj matematici ovo je vrlo komplikovana oblast koja je povezana sa Riemann-Hilbert-ovim problemom i Painlevé-ovom transformacijom. U solitonskoj fizici, prva stvar je korišćenje prave jednačine za izvođenje nelinearne jednačine. Specijalno u komunikacionoj oblasti, ako je razmatrani materijal centralno simetričan, članovi trećeg reda polarizovanosti će biti dominantni članovi za dobijanje nelinearnog efekta. Posle koristimo Fourier-ovu transformaciju da jednačinu prevedemo u frekventni domen da bi smo dobili nelinearnu Schrödinger-ovu jednačinu (NLSE). Postoji takođe tendencija u kvantnoj optici za korišćenje druge kvantizacije za pisanje NLSE na komplikovaniji način da bi videli

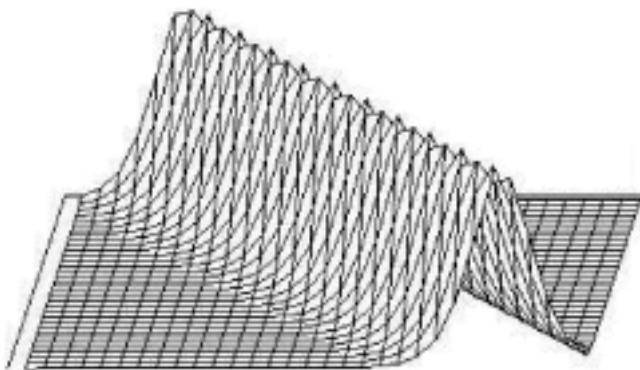
detaljno interakciju solitonskog impulsa i polja vlakna. Klasično, optički solitoni su opisani nelinearnom Schrödinger-ovom jednačinom (NLSE), što pokazuje da klasični optički solitoni imaju kvantne analoge u formi superpozicije međusobno vezanih multi-fotonskih stanja. Opis takvih vezanih multi-fotonskih stanja je dat Bethe-Ansatz-ovim rešenjem drugo-kvantizovane NLSE. Solitonski impuls u optičkom vlaknu opisuje se nelinearnom Schrödinger-ova jednačinom obvojnice impulsa:

$$j \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\beta''}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \sigma |u|^2 u - j\Gamma u$$

gde je $u(z,t)$ obvojnica optičkog impulsa koja je u opštem slučaju funkcija rastojanja i vremena, σ je srednja vrednost nelinearnog Kerr-ovog efekta, $\beta''=d^2\beta/d\Omega^2$ je disperzija optičkog vlakna. Prvi član sa desne strane jednačine potiče od efekta hromatske disperzije vlakna, i kada samo postoji ovaj član on izaziva vremensko proširenje impulsa. Drugi, nelinearni član potiče od zavisnosti indeksa prelamanja vlakna od intenziteta impulsa i ovaj član bi da deluje usamljeno, proširivao spektar impulsa. Treći član na desnoj strani predstavlja efekte gubitaka. Ovaj član se uz pomoć optičkog pojačavača svodi na nulu duž određene trase. Kada se član gubitaka svede na nulu, jednačina ima rešenje poznato kao soliton:

$$u(z,t) = \sqrt{\frac{\beta''}{\sigma t_s^2}} \operatorname{sech}\left(\frac{t}{t_s}\right) \exp\left(-j \frac{\beta'' z}{2t_s^2}\right)$$

gde je t_s širina solitonskog impulsa. Iz izraza se vidi da oblik impulsa ne zavisi od rastojanja, osim što mu se faza menja se z , te je nedisperzivan u vremenskom domenu.

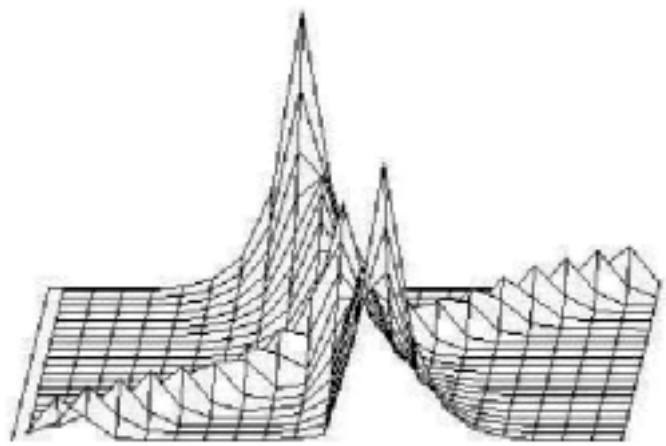


Rešenje solitona

Možemo videti da je prostorna anvelopa solitona hiperbolički sekans i da nema disperziju pri propagaciji.

4. SUDAR DVA SOLITONA

Slika koja sledi opisuje sudar dva solitona. U teoriji solitona, rešenje prvog reda je sam soliton, a rešenja viših redova predstavljaju multi-solitonska stanja i moraju opisivati sudar i interakciju između solitona. Sa grafika možemo videti da se superpozicija solitona razlikuje od normalnog koncepta jer amplituda na mestu sudara nije zbir dve različite amplitude.



Sudar dva solitona

5. PRIMENE

Alternativna tehnologija, koja daje velika obećanja za podmorske mrežne sisteme velikog kapaciteta (100Gbit/s) je multitalasni solitonski prenos. Solitonski signali nude preimuštvo velike linijske brzine bita po kanalu (10-40Gbit/s) i velike pojačavačke (repetitorske) deonice (60-100km), što je nepojmljivo za konvecnionalne sisteme. Ostali potencijali za primenu u podmorskim mrežama su: regeneracija signala u samoj optičkoj liniji (vlaknu) i potpuno optičko odgranjavanje/demultipleksiranje u vremenskom domenu.

Sa velikom inovacijom, kakva je uvođenje pojačavača od Erbijumom dopiranog optičkog vlakna (EDFA) u komunikacijama svetlosnim talasima, zabeležen je rapidan porast primene optičkih mreža širom sveta. Da bi se zadovoljili konstantno izazovni zahtevi u optičkim mrežama u pogledu kapaciteta informacija, funkcionalnosti i usmeravanja talasa, pouzdanosti sistema i snižavanju troškova mreža, bila je nužna adaptacija odgovarajućih tehnologija. Do sada se konvencionalni podmorski optički prenos (na rastojanjima 9000km) bazirao na formatu NZR (non-return-to-zero). Sistem sa jednodokanalnim NZR prenosom, tj. prenosom na talasnoj dužini nulte disperzije u okolini 1,55nm, ima ograničenje bitske brzine do 10Gbit/s. Međutim, ako se koristi multipleksiranje u domenu talasnih dužina (WDM), do sada najveći ukupni prenosni kapacitet ovakvog sistema, dostigao je kapacitet od 100Gbit/s na rastojanju 9000km ili 6000km zavisno od toga da li ima ili nema ugrađenu korekciju grešaka unapred-FEC. Međutim, ovakvi sistemi rade sa relativno kratkim pojačavačkim deonicama (45km), i sa maksimalnom linijskom brzinom od 5Gbit/s, koja nije direktno kompatibilna sa STM hijerarhijom.

Obećavajuća alternativa za podmorske optičke sisteme je solitonski prenos. Sa optičkim frekventnim filterima kao sredstvom pasivne kontrole, postignute su veće pojačavačke deonice (65-70km) i veća ukupna dužina prenosa (10-20 hiljada kilometara) sa linijskim brzinama bita pojedinih kanala od 10-20Gbit/s. Maksimalni kapacitet sistema, prenosna udaljenost i razmak pojačavača ograničeni su vremenskim džiterom, koji je izazvan pojačanjem šuma spontane emisije fotona i solitonskim kolizijama kod DWDM prenosa. Način da se ova ograničenja prevaziđu je upotreba

optičkih vlakana sa velikom efektivnom površinom provođenja svetlosti (LEA vlakna).

Drugi način za poboljšanje performansi sistema je uvođenje upravljanja disperzijom (DM), koje se sastoji u variranju disperzije vlakna unutar pojačavačkog polja, po eksponencijalno opadajućem stepenu. U zadnje vreme su demonstrirani prekookeanski solitonski WDM sistemi sa oba ova principa SDM i tehnika klizajućeg filtriranja, gde je postignut ukupni kapacitet veze od 80Gbit/s.

Poboljšanje tehnologije pasivnog frekventnog filtera, postignuto je optičkom regeneracijom signala unutar samog optičkog vlakna. Takva solitonska regeneracija počiva na principu sinhronne modulacije (amplitude i/ili faze). Učinak modulacije u samom vlaknu (linijska modulacija) se ogleda u potiskivanju solitonskog vremenskog džitera, izazvanog pojačanim šumovima, međusobnom interakcijom signala impulsa i kolizija, dok fiksni frekventni filtri, koji su smešteni iza modulatora, obezbeđuju mehanizam povratne sprege za kontrolu amplitude. Kako anvelopa solitona nije izobličena u toku propagacije, to funkcije obnavljanja takta i kontrola amplitude, kombinovane zajedno predstavljaju potpunu regeneraciju signala. Posebno, amplitudna modulacija (IM), uz frekventne filtere, omogućava virtuelno neograničene dužine prenosa signala, kao i dalje povećanje dužine pojačavačke deonice (100-150km).

Druga tehnika regeneracije signala, podrazumeva korišćenje sinhronne fazne modulacije (PM), koja takođe obezbeđuje efikasno potiskivanje džitera, i uz korišćenje optičkih frekventnih filtera, dobija se dodatno poboljšanje. Poređenjem IM/PM tehnika regeneracije signala, kako je urađeno sa jednokanalnim sistemima 20Gbit/s, pokazalo je da samo IM (amplitudna modulacija) u krajnjem ishodu obezbeđuje regeneraciju signala. Nasuprot tome, PM (fazna modulacija) je mnogo efikasnija od IM u potiskivanju interakcije između solitona. Optimizirana kombinacija obeju modulacija (IM i PM), strogo zavisi od pojačavačkih i modulatorskih raspona. U oblasti prekookeanskih komunikacija velikog kapaciteta, smanjuje se interes za jednokanalne sisteme tipa tačka-tačka, u korist povećanog interesa za veze koje povezuju više tačaka i na kojima se prenosi više talasnih dužina. Postavlja se pitanje, koje će mesto zauzeti primena solitonskog regeneratorskog prenosa u podmorskim mrežama?

Kako se ispostavilo, sinhrona solitonska modulacija nije stvarno ograničena za jednokanalnu primenu, čak i kada se WDM kanali kroz sistem prostiru različitim brzinama. Zaista, kada se primeni posebno pravilo rasporeda talasnih dužina, moguće je postići sinhronizaciju periodičnih WDM signala duž veze, što onda omogućava istovremenu regeneraciju svih kanala kroz jedan modulator.

Simulacijom realnih sistema, potvrđen je potencijal prenosnog kapaciteta od $N \times 20$ Gbit/s na sinhrono moduliranim WDM solitonskim prekookeanskim prenosnim optičkim sistemima. Kao u pasivno kontroliranim solitonskim prenosima sa ukupnim kapacitetom od 100Gbit/s i NRZ formatom, tako i karakteristike WDM regeneracije, striktno zavise od upravljanja disperzijom (DM), uključujući i kompenzaciju disperzije trećeg stepena.

Nove optičke komponente, kao što su optičke površine sa naborima, koje izazivaju pojavu čirpinga, tj. zavisnost frekvencije od snage signala, moraju se i dalje usavršavati i opredeliti za ovu namenu. Generalne rečeno, ključna komponenta regeneratorskih solitonskih sistema je optički

modulator sa optimizovanim karakteristikama amplitudne/fazne modulacije kod linijskih brzina koje su znatno veće od 10Gbit/s, nužna je kompletna upotreba čisto optičkih komponenata, uključujući i optički obnavljač vremenskog takta (OCR), zbog uskog grla elektronskih modulatora. Mnogi prilazi potpuno optičkoj regeneraciji signala, koji baziraju na Kerr-ovoj nelinearnosti vlakna, obrađeni su i demonstrirani, ali njihov dalji napredak još uvek zahteva polarizacionu nezavisnost, stabilnost okruženja sistema (kabela i opreme), i konačno, rad sa više talasnih dužina u sistemu.

Što se tiče OCR-a, jedan prilaz, koji mnogo obećava, je korišćenje lasera u vidu optičkog prstena (prstenasti optički laser) sa nepromenljivim svetlosnim modom. Osnovni princip se sastoji u tome da se pseudo-slučajna sekvenca podataka može koristiti za kontrolu signala kroz držanje nepromenljivosti modova aktivnog harmonika. Tada, izlaz iz lasera predstavlja obnovljeni vremenski takt. Pojava ograničenog broja nula (0) u sekvenci kontrolnog signala ne utiče na izlazni takt, zbog uprošćenja efekta recirkulacije impulsa u šupljini lasera.

Ako dinamika poluprovodničke nelinearnosti spreči realizaciju OCR-a u području iznad 20Ghz, tada će kroz pasivno preklapanje impulsa, biti moguća optička multiplikacija na 40-80GHz. Potreban je dalji napredak ultra brzih Kerr-ovih optičkih uređaja da bi se postigla samo veća frekvencija vremenskog takta.

Tehnološka ograničenja za veće brzine jednokanalnih solitonskih sistema (40Gbit/s), odnose se na laserske izvore, čije trajanje impulsa je reda pikosekunde i ima mali džiter, i na multipleksere/demultipleksere u vremenskom domenu, koji treba da imaju veliki izlazno/ulazni kapacitet. Za WDM solitonske sisteme, koji predstavljaju najizazovnije primenu solitona u podmorskim vezama, ograničenje kapaciteta veze nastaje usled ograničenog frekventnog opsega kod EDFA, kako se može proširiti kroz ujednačavanje pojačanja pomoću podesivog filtriranja signala.

Pasivno-kontrolirani frekventni solitonski sistemi su postali realni uz odgovarajuće foto-osetljive Fabry-Perot-ove filtere u vidu optičkog vlakna. Dok su aktivno-kontrolirani WDM solitonski sistemi sa ukupnim kapacitetom veze od 100Gbit/s teoretski ostvarivi, ostaje još da se istražuju neki aspekti u domenu multi-talasnih sinhronne modulacije, upravljanja disperzijom i opšte tolerancije sistema.

Kod ovakvih WDM sistema, granična linijska brzina bita (ili blizu) 40Gbit/s će se eventualno dostići primenom čiste optičke regeneracije signala, što sa druge strane zahteva čisto optičko obnavljanje vremenskog takta i čistu optičku modulaciju.

Dok solitonski prenosni sistemi nude jasne prednosti kod NRZ (non return to zero) sistema, kod WDM sistema se traži brzi napredak ka postizanju ukupnog kapaciteta od 100Gbit/s u cilju dobijanja konkretne alternative za prekookeansko komunikaciono tržište. Prekookeanski solitonski mrežni sistemi, koji će biti predmet daljih istraživanja, neće imati samo veće pojačavačke deonice i minimalan broj aktivno kontroliranih komponenti, već takođe i širegranice Q-faktora sistema, kako bi se uzela u obzir nesavršenost brojnih komponenata, kvarovi i starenje sistema. Takvi solitonski sistemi će zahtevati i sasvim novu tehniku nadzora, što ostaje da bude predmet posebnog razvoja.

REFERENCE

1. Stefanto Loughi, Dark solitons in degenerate optical parametric oscillators, *Optics Letters*. Vol.21, no. 12
2. A. D. Boardman et al., Magnetic Control of Optical Spatial Solitons, *Physics Review Letters*. 75. 4591 (1995)
3. Guoquan Zhang et al., Optical dark and bright spatial solitons in photorefractive media, *Physics Letters. A* 204 (1995)146-150
4. Ze Zhang et al., Optical "Multiexcitons" Quantum Gap Solitons in Nonlinear Bragg Reflectors, *Physics Review Letters*. 75. 3430 (1995)
5. Hermann A. Haus and Williams S. Wong, Solitons in optical communication, *Review of Modern Physics*. Vol. 68. No. 2, April 1996.