

Модель деструктивных воздействий на основе нелинейных эффектов в волоконно-оптических линиях связи с гибкой сеткой частот

А.П. Бойко, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого (ВАС им. С. М. Будённого), докторант кафедры сетей связи и систем коммутации, к.т.н.; varenuxa89@gmail.com

С.М. Одоевский, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, профессор кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, д.т.н.; odse2017@mail.ru

С.А. Ясинский, ВАС им. С. М. Будённого, старший научный сотрудник, доцент, д.т.н.; yasinsky777@mail.ru

УДК 621.391.63

DOI: 10.34832/ELSV.2026.78.4.002

Аннотация. Предложена математическая модель деструктивных воздействий, основанная на использовании нелинейных эффектов в оптическом волокне. Рассматривается сценарий частичного доступа потенциального злоумышленника к спектральному ресурсу ВОЛС в условиях реализации концепции «спектр как услуга». Показано, что при формировании оптических сигналов повышенной мощности в ограниченном частотном диапазоне возможно целенаправленное ухудшение качества передачи легитимных оптических каналов за счёт нелинейной интерференции. В рамках модели формализуются спектральные и энергетические ограничения на действия потенциального злоумышленника, вводится понятие сценария деструктивного воздействия и предлагается количественный показатель ущерба, основанный на нарушении требований к качеству передачи оптических сигналов в целевом диапазоне частот. Полученная модель позволяет анализировать спектрально-избирательные атаки и выявлять наиболее уязвимые фрагменты спектра.

Ключевые слова: гибкие оптические сети, нелинейные эффекты, деструктивные воздействия.

Для цитирования: Бойко, А.П. Модель деструктивных воздействий на основе нелинейных эффектов в волоконно-оптических линиях связи с гибкой сеткой частот / А.П. Бойко, С.М. Одоевский, С.А. Ясинский // Электросвязь. – 2026. – № 4. – С. 15-24.

ВВЕДЕНИЕ

Коммерческие операторы связи постоянно развивают телекоммуникационные услуги, последовательно смещая «точку аренды» от цифровых каналов и VPN к более низким уровням — длинам волн, оптическим волокнам, выделенным волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) [1]. Переход к гибкой сетке частот (flex-grid) повышает спектральную эффективность и позволяет формировать каналы переменной ширины под требуемую скорость и формат модуляции, высвобождая спектр для других соединений [2, 3]. В сочетании с реконфигурируемыми оптическими мультиплексорами ввода/вывода и средствами программного управления это делает спектр самостоятельным телекоммуникационным ресурсом, которым можно управлять и который можно динамически распределять. В таком контексте «спектр как услуга» (эластичный оптический канал) означает предоставление пользователю в ВОЛС заданного частотного диапазона, внутри которого он формирует спектральные каналы на основе собственного оборудования и выбираемых параметров передачи. Это обеспечивает спектральное разграничение арендаторов и фактически позволяет рассматривать одну пару волокон как множество виртуальных волокон, на базе которых могут создаваться изолированные виртуальные оптические сети. При этом у пользователя появляется возможность гибко варьировать

характеристики создаваемых соединений — менять скорость передачи оптических сигналов, форматы модуляции, типы линейного кодирования и качество передачи в зависимости от текущих задач и условий распространения сигнала.

Несмотря на очевидные преимущества концепции аренды спектра в ВОЛС, данный подход сопровождается появлением дополнительных рисков, обусловленных возможными деструктивными воздействиями на физическом уровне. При реализации множественного доступа к спектральному ресурсу оптическое волокно превращается в конфликтную среду, в которой оптические сигналы различных пользователей неизбежно взаимодействуют между собой. Такое взаимодействие основано на нелинейных эффектах в оптическом волокне, таких как четырёхволновое смешение и перекрёстная фазовая модуляция, которые могут приводить к деградации качества передачи. Различие уровней мощности, форматов модуляции и спектральной плотности сигналов повышает вероятность возникновения межканальных перекрёстных помех, в том числе преднамеренного характера. В отличие от аренды выделенных длин волн или оптических волокон, контроль над спектральным окружением в этом случае существенно ограничен, что затрудняет прогнозирование и предотвращение нарушений работы каналов. В результате устойчивость функционирования