

ВЛИЯНИЕ КОНТРОЛЯ МОЩНОСТИ НА АТМОСФЕРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ ВО ВРЕМЯ СНЕГОПАДА И ДОЖДЯ

Ю. О. Трусова, Н. Н. Вовк, Ю. А. Анисимов, А. В. Овсов, М. А. Царев, Н. Н. Мулин, С. Н. Копылов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Растущий спрос на высокоскоростную связь и услуги с высокой пропускной способностью, а также требования к ограничению энергопотребления привели к определению основных тенденций развития систем и технологий связи. Атмосферная оптическая линия связи (АОЛС, FSO) - это технология прямой видимости, которая передает информационный сигнал лазерным излучением через атмосферный канал вместо оптоволоконных кабелей. Она имеет несколько преимуществ, таких как безлицензионный спектр, большая пропускная способность, высокая скорость передачи данных, простота установки, высокий уровень безопасности и низкие требования к энергопотреблению.

В системе FSO обычно применяют формат двоичной амплитудной модуляции, такой как модуляция с включением-выключением (ООК), из-за его эффективности и простоты. ООК модуляция развернута с модуляцией интенсивности с прямым обнаружением; в передатчике электрический сигнал преобразуется в оптический сигнал путем модуляции интенсивности лазерного источника с использованием схемы модуляции ООК. На приемном конце фотодиод преобразует оптические интенсивности в соответствующий фототок. Схема PPM – еще один популярный формат модуляции, используемый в системах FSO; он более энергоэффективен, чем модуляция ООК, но имеет меньшую эффективность ширины полосы и повышенную сложность демодуляции.

К сожалению, производительность и доступность линии FSO, а также диапазон линии сильно зависят от погоды и атмосферных условий. На беспроводные каналы FSO неблагоприятно влияют различные атмосферные условия, такие как туман, сильный дождь, снег, пыль и дымка; они увеличивают потерю мощности и приводят к ухудшению BER. Чтобы уменьшить замирание канала, в передатчике можно варьировать несколько параметров, таких как тип модуляции, мощность, скорость кодирования и комбинации параметров адаптации.

Рассмотрим системы FSO отдельно для случая дождя и снега. Размер частиц снега находятся посередине между размерами частиц тумана и частиц дождя. Поэтому уровень ослабления из-за снега находится между уровнями для дождя и тумана. Уровень выше, чем с дождем, но ниже, чем с туманом. В этом случае ослабление сравнимо с затуханием в тумане и составляет от 30 до 350 дБ/км.

Модель для снега

Уровень ослабления сигнала при снеге зависит от того, является ли снег сухим или влажным. Сухой снег влияет на канал, когда скорость снегопада низкая, тогда как мокрый снег, влияет на канал, когда скорость снегопада высокая. Затухание определяется на определенном расстоянии и измеряется в дБ/км. Удельное затухание α зависит от скорости снега S мм/ч и определяется по формуле

$$\alpha = aS^b \quad (1)$$

сухой снег: $a = 5,42 \cdot 10^{-5} \lambda + 5,49$, $b = 1,37$

мокрый снег: $a = 1,02 \cdot 10^{-4} \lambda + 3,78$, $b = 0,72$

Модель для дождя

В системе FSO ослабление в дожде особенно велико и сильно зависит от различных моделей распределения капель по размерам. Наиболее часто используемые распределения капель дождя были предложены Маршаллом и Палмером. Удельное затухание из-за дождя для беспроводной оптической линии определяется по формуле

$$\gamma = aR^b, \quad (2)$$

где R – скорость дождя в мм/ч, a и b – параметр закона. Эти параметры зависят от частоты, распределения капель по размерам и температуры дождя.

В сообщениях FSO принимаемая мощность P_r имеет следующее выражение:

$$P_r = P_t \tau_{tx} \tau_{rx} \frac{D^2}{(\theta L)^2} 10^{\frac{-\alpha L}{10}}, \quad (3)$$

где P_t – мощность передатчика, τ_{tx} и τ_{rx} – эффективность передатчика и приемника, D – диаметр приемника, θ – угол расхождения, L – длина связи.

Отношение сигнал/шум (SNR) для системы оптической связи, использующей лавинный фотодиодный (APD) детектор, составляет

$$SNR = \frac{(R_0 P_r M)^2}{2qBM^{x+2}(R_0 P_r + I_D) + 2qI_L B + 4kTBF / R_{eq}}, \quad (4)$$

где R_0 – первичная чувствительность APD, M – коэффициент усиления, x – коэффициент избыточности шума, I_D – ток наводки, I_L – ток утечки, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, B – эквивалентная ширина полосы шума, T – температура системы в Кельвинах, F – коэффициент шума, R_{eq} – эквивалентное сопротивление цепи.

Измеренное значение SNR сравнивается с желаемым уровнем ($\gamma = 30$ дБ). Разница между этими двумя значениями квантуется с помощью контроля мощности, и решение контроля мощности (КМ) передается пользователю через канал обратной связи.

$$P_{i+1} = P_i - C\Delta$$

$$C = \begin{cases} -1, & \text{если } \gamma \leq \gamma_{th} \\ 1, & \text{если } \gamma > \gamma_{th}, \end{cases} \quad (5)$$

где C – команда КМ, Δ – размер шага.

Производительность системы FSO будет измеряться с помощью BER для двух типов модуляции, модуляции ООК и N-PPM.

$$BER_{OOK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR} \right), \quad (6)$$

$$BER_{N-PPM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR \frac{N}{2} \log_2(N)} \right). \quad (7)$$

Параметры моделирования представлены в таблице.

Параметры моделирования

Наименование	Значение
Длина волны	850 нм
Мощность передатчика	50–100 мВт
Угол расхождения передатчика	2 мрад
T_x/R_x	0,5
Диаметр приемника	0,1 м
Ток наводки	0,05 нА
Коэффициент усиления	100
Размер шага	5 мВт
Коэффициент избыточности шума	0,5
Ширина полосы шума	25 МГц

На рис. 1 показано ослабление в дожде и снегу для двух типов снега. Сухой снег имеет более высокую степень затухания, чем мокрый. Также можно заметить, что затухание в снегу выше, чем затухание в дожде, из-за большого размера частиц снега. Например, при скорости 10 мм/ч затухание в мокром снегу превышает затухание в дожде на 6 дБ.

Зависимость полученной мощности от расстояния между линиями связи для мокрого снега с затуханием, показана на рис. 2. На рис. 2 видно, что затухание в мокром снегу может снизить принимаемую мощность на 15 дБ на расстоянии 1 км. Использование КМ не влияет на принимаемую мощность при низкой скорости снега 1 мм/ч, но при высокой скорости снега КМ оказывает большее влияние на полученную мощность, особенно при увеличенном расстоянии линии связи.

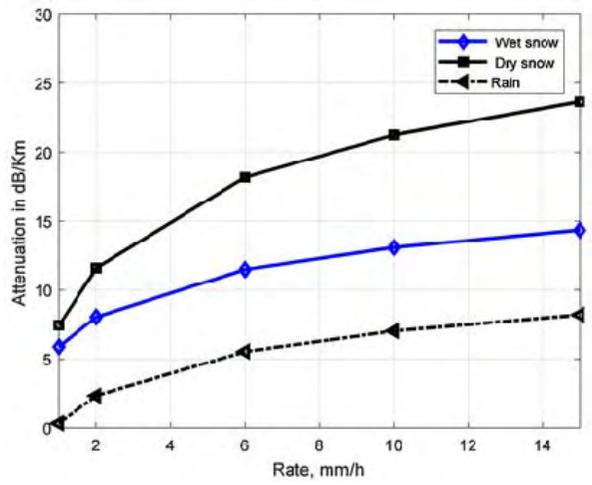


Рис. 1. Затухание сигнала в дожде и снегу

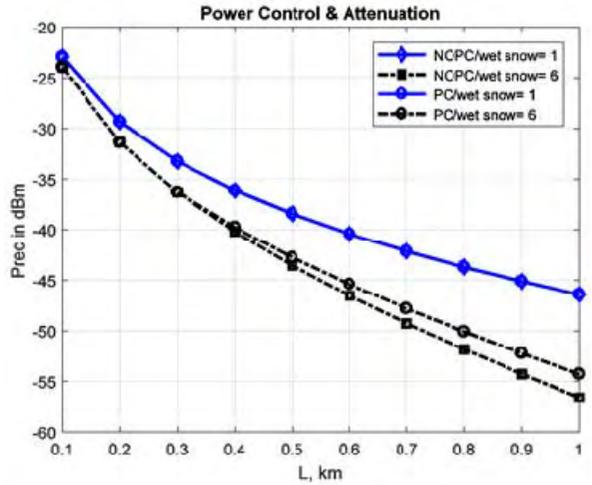


Рис. 2. Принимаемая мощность при мокром снегу

Рис. 3 показывает SNR с КМ во время мокрого снега для двух скоростей снегопада 1 и 6 мм/ч. Использование КМ улучшает SNR для снега со скоростью 6 мм/ч, но не влияет при низкой скорости снега 1 мм/ч. Улучшение очевидно после расстояния 0,4 км и достигает 3 дБ при $L = 1$ км.

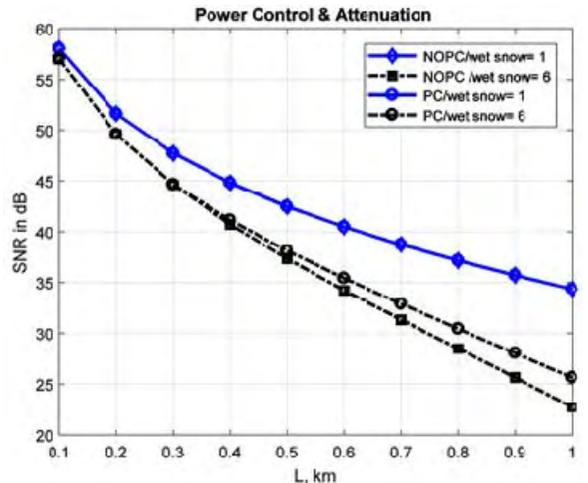


Рис. 3. SNR при мокром снегу

На рис. 4 показано влияние КМ на BER для модуляции ООК. На расстоянии 1 км от линии BER для скорости снега 6 мм/ч оказывается в пределах от $9 \cdot 10^{-3}$ до $6 \cdot 10^{-3}$. BER для низкого уровня снега лучше, чем для более высокого уровня.

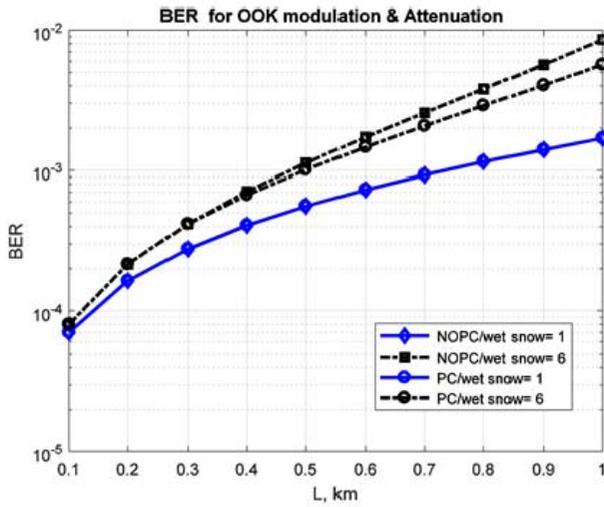


Рис. 4. BER для ООК модуляции для мокрого снега

На рис. 5 сравниваем BER для модуляции ООК с модуляцией 16-PPM для скорости снега, равной 6 мм/ч. КМ улучшает BER для модуляции как 16-PPM, так и ООК, особенно на расстоянии линии связи более 0,6 км. Производительность PPM лучше, чем у ООК-модуляции.

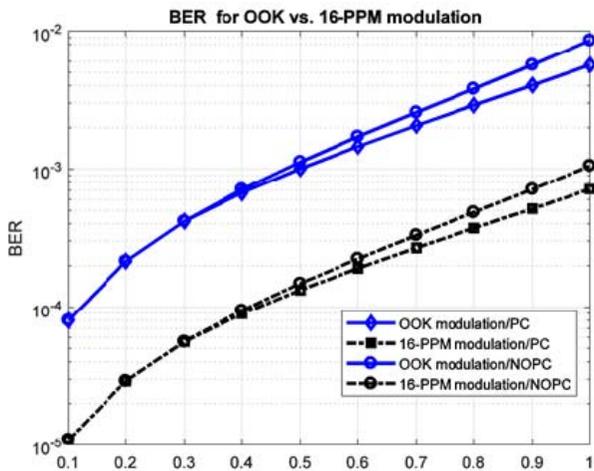


Рис. 5. BER для модуляции ООК и PPM

На рис. 6 показана ОСШ для сухого снега со скоростью 1 и 6 мм/ч. КМ не влияет на SNR для низкой скорости снега, но при высокой интенсивности снега КМ немного улучшает SNR. Сухой снег имеет большее затухание, чем мокрый снег.

На рис. 7 показан эффект ПК с модуляцией ООК для сухого снега при скорости снега 1 и 6 мм/ч.

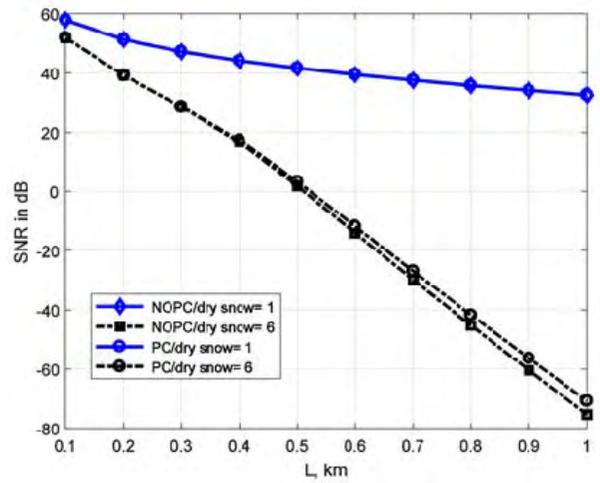


Рис. 6. SNR для сухого снега

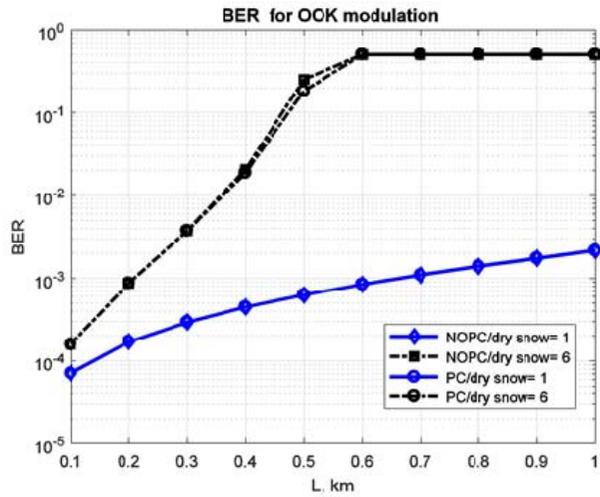


Рис. 7. BER для ООК-модуляции для сухого снега

На рис. 8 показано, что КМ увеличивает принимаемую мощность при ослаблении в дожде на 1 дБ для обеих скоростей дождя при $L = 1$ км. Кроме того, на рис. 9 показано улучшение SNR с КМ для обеих скоростей дождя.

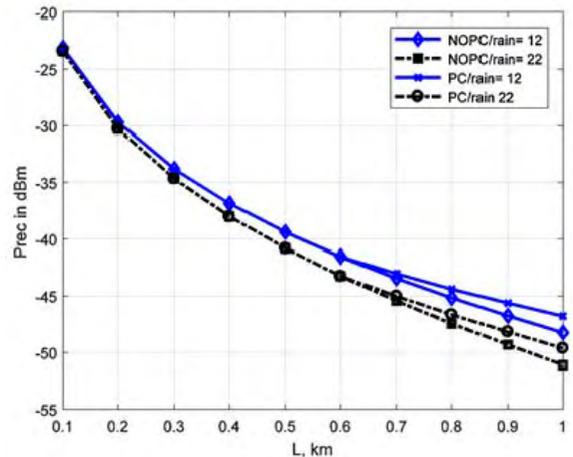


Рис. 8. Принимаемая мощность для дождя

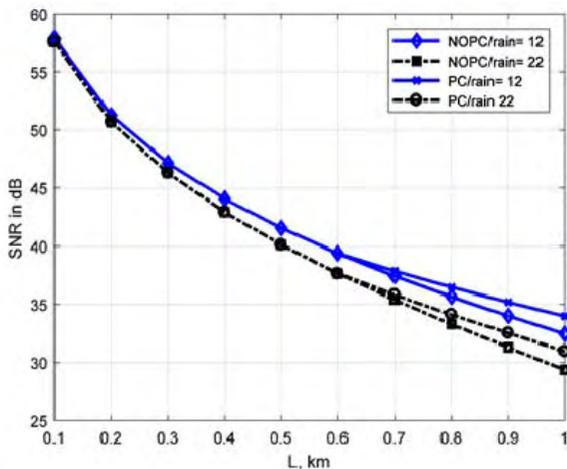


Рис. 9. SNR для дождя

На рис. 10 показан BER для модуляции OOK при затухании в дожде, видно улучшением от $3,6 \cdot 10^{-3}$ до $2,6 \cdot 10^{-3}$ при $L = 1$ км. На рис. 11 показано, что 16-PPM превосходит модуляцию OOK.

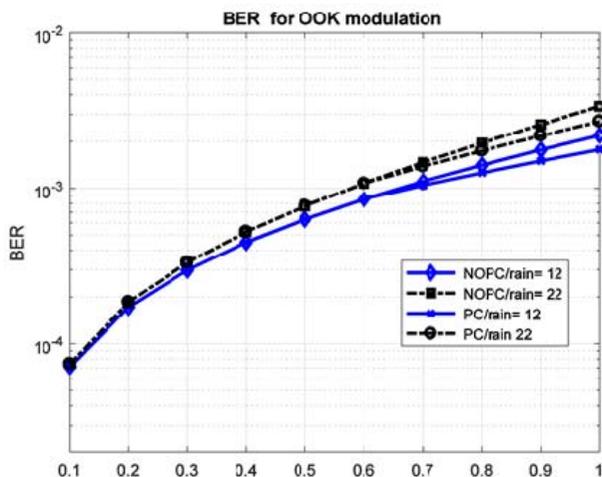


Рис. 10. BER для OOK модуляции при дожде

Система связи FSO – это развивающаяся технология, которая обещает решить проблему узкой полосы пропускания. Однако, погодные условия, такие как снег и дождь, сильно ослабляют канал связи и ухудшают производительность системы. Различные сценарии адаптации были предложены для использования в связи FSO, и один из них – передатчик

контроля мощности. В этой статье мы исследовали влияние КМ передатчика на BER для модуляции OOK и PPM во время их ослабления при снеге и дожде. Результаты показывают, что КМ может улучшить BER для сильного мокрого снегопада, но почти не влияет на качество связи FSO при сухом снегопаде. КМ также улучшает канал связи и BER во время высокого уровня осадков. BER для PPM модуляции лучше, чем для OOK модуляции.

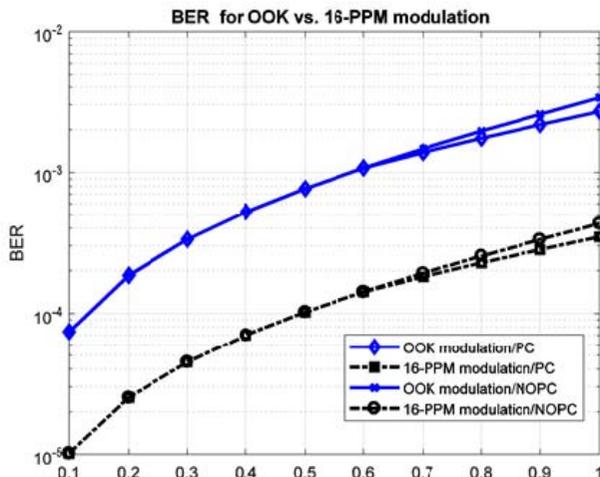


Рис. 11. Сравнение BER для модуляции OOK и PPM при дожде

Литература

1. Elganimi T.Y. Performance Comparison between OOK, PPM and PAM Modulation Schemes for Free Space Optical (FSO) Communication Systems: Analytical Study. International Journal of Computer Applications. 2013. Т. 79.Р. 22–27.
2. Hassan N. B. and Matinfar M. D. On the Implementation Aspects of Adaptive Power Control Algorithms in Free-Space Optical Communications. Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT), Tehran, 2014. P. 1–5.
3. Prediction Methods Required for the Design for Terrestrial Free-Space Optical Links. Recommendation ITU-R. 2007. P. 1814.
4. Zhang W. and Moayeri N. Power-Law Parameters of Rain Specific Attenuation. 2011.