

УДК 621.396:681.34

Б.Б. Поспелов, д-р техн. наук, проф.

ПОВЫШЕНИЕ СВЯЗАННОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ В КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Выполнено теоретическое обобщение управляемых непрерывных каналов связи на случай многолучевой среды между узлами с учетом воздействия внешних источников помех. Впервые исследованы возможности повышения связанности беспроводных сенсорных сетей в критических условиях на основе использования на физическом уровне управляемых непрерывных каналов связи.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, управляемый непрерывный канал связи, критические условия, текущая удельная пропускная способность.

B. Pospelov, Doc. of Sc. (Eng.), Prof.

INCREASE CONNECTIVITY OF WIRELESS SENSOR NETWORKS IN CRITICAL CONDITIONS BASED ON THE CONTROL OF CONTINUOUS COMMUNICATION CHANNELS

The theoretical generalization controlled continuous channels of communication in the event of a multipath environment between nodes, taking into account the impact of external interference sources. First of all, investigated the possibility of increasing connectivity of wireless sensor networks in critical conditions through the use of the physical layer of controlled continuous communication channels.

Keywords: wireless sensor network, controlled continuous channel of communication, critical conditions, the current specific capacity channels.

Постановка проблемы в общем виде. На современном этапе сфера использования беспроводных сенсорных сетей (БСС) стремительно расширяется. Размещая сенсорные датчики на различных платформах, в том числе и беспилотных, возможно накапливать информацию и управлять различными процессами, системами вооружения и объектами в критических ситуациях. Особая потребность в БСС ощущается в агрессивных средах и критических условиях, опасных для человека. С помощью БСС может эффективно решаться широкий спектр задач по контролю окружающей среды, определению различных опасностей и угроз, наблюдению за объектами критической инфраструктуры и управлению оружием. В промышленности и в быту БСС могут использоваться для мониторинга технологических процессов и контроля систем обеспечения жизнедеятельности человека.

Однако для БСС характерен ряд новых проблем, изучению которых уделяется большое внимание [1-3]. Одной из них является проблема низкой связанности, приводящей к дроблению сети на не связанные между собой группы узлов. Основной причиной этого следует считать существенное снижение пропускной способности между узлами, которое может обуславливаться критическими условиями их применения, характеризующимся наличием различных естественных и искусственных преград в беспроводной среде, воздействием мощных преднамеренных помех, а также помех от соседних узлов и сторонних радиосистем. В условиях многолучевости даже в отсутствие помех узлы сети могут попадать в зону нежелательных замираний. При этом связь с такими узлами будет нарушаться или вовсе может отсутствовать.

Постоянный рост требований к объему и скорости передаваемой информации в

критических ситуациях, а также существенное усложнение условий в беспроводной среде с учетом подвижности используемых платформ порождают проблему повышения связанности в БСС, базирующихся на беспилотных летательных аппаратах (БЛА). Данная проблема непосредственно связана с основными приоритетными фундаментальными и прикладными научными исследованиями в области разработки и создания эффективных систем связи и управления в критических условиях, мониторинга и обнаружения угроз возникновения различных чрезвычайных ситуаций.

Анализ последних исследований и публикаций. Последние исследования и публикации, посвященные проблеме повышения связанности БСС на основе БЛА в критических условиях, в основном касаются оптимизации числа и размещения БЛА в пространстве, а также маршрутов доставки информации при заданной пропускной способности каналов связи между узлами. При этом возможности увеличения пропускной способности каналов между узлами в критических условиях на физическом уровне не рассматриваются. Иначе говоря, решение проблемы повышения связанности БСС (в терминах классической 7-уровневой модели взаимодействия открытых систем) предлагается осуществлять преимущественно за счет сетевого и транспортного уровней при заданной пропускной способности на физическом уровне.

Иной подход основывается возможности канального и физического уровня в части фазирования в заданной пространственной точке беспроводной среды сигналов, излучаемых близко расположенными узлами [4]. Такой подход, по нашему мнению, является трудно реализуемым в критических условиях, связанных, прежде всего, с неоднородностью и нестационарностью свойств беспроводной среды, а также высокой пространственной динамикой БЛА. Несмотря на полученные в этом направлении положительные результаты, проблема доступности частотного ресурса и высокой пропускной способности физического уровня в БСС вне зависимости от критических условий, складывающихся в среде между узлами, остается не решенной. Особая актуальность и сложность решения данной проблемы возрастают в связи с активным использованием БСС и ожидаемым принятием на вооружение большого числа новых разновидностей БЛА, в том числе и миниатюрных, оборудованных сенсорами высокой разрешающей способности. При этом решение проблемы необходимо осуществлять при жестком ограничении частотного и энергетического ресурса узлов.

Другой подход к повышению связанности БСС может быть основан на реализации концепции управляемого непрерывного канала связи (УНКС) при заданных устройствах частотно-временной обработки на передающей и приемной сторонах [5,6]. Важной особенностью данного подхода является возможность целенаправленного управления различными показателями качества канала связи между узлами, например, его текущей пропускной способности, определяющей связанность между узлами в БСС. При этом рассмотрение подхода ограничивается однолучевой моделью среды, и не исследуются пространственные распределения пропускной способности в среде между узлами в критических условиях.

Цель статьи. Выполнить теоретическое обобщение УНКС на случай многолучевой среды между узлами с учетом воздействия внешних источников помех и исследовать возможности увеличения удельной пропускной способности физических каналов для повышения связанности БСС на основе использования БЛА в критических условиях применения.

Изложение основного материала. С целью теоретического обобщения УНКС на случай многолучевой среды между узлами с учетом воздействия внешних источников помех представим оператор УНКС в виде композиции $F_{UT}^{UR}(\bullet) = F_{UR}(\theta r) \circ F_M(j_\beta, H, n) \circ F_{UT}(\theta t)$, где $F_{UT}(\theta t)$ и $F_{UR}(\theta r)$ - операторы, описывающие характеристики направленности антенн на передающем и приемном узле в направлениях θt и θr при заданных управлениях $UT \in \Omega_T$ и $UR \in \Omega_R$ соответственно. Пусть оператор $F_M(j_\beta, H, n)$ описывает преобразования сигналов в

многолучевой среде, характеризуемой канальной матрицей H , с учетом воздействия внешних помех j_β и шумов n . Тогда для произвольного сигнала x_λ передающего узла сигнал приемного узла

$$y_\lambda = F_{UR}(\theta r) \circ F_M(j_\beta, H, n) \circ F_{UT}(\theta t)x_\lambda. \quad (1)$$

Обозначим через $\alpha = (F_{UT}, F_{UR})$, $\alpha \in \Omega_\alpha^d$ совокупность операторов, определяющих класс допустимых управляемых характеристик направленности передающей и приемной антенн в узлах, а через $\gamma = (x_\lambda, j_\beta, \theta t, \theta r, H, F_M)$, $\gamma \in \Omega_\gamma^d$ совокупность параметров, определяющих класс допустимых критических ситуаций в среде между узлами.

Рассмотрим агрегированный класс $s_d = (\alpha, \gamma)$, $s_d \in \Omega_s^d$ допустимых управляемых характеристик направленности антенн и ситуаций в беспроводной среде между узлами. Показатель качества связи между узлами определим функционалом $\Phi(x_\lambda, y_\lambda, UT, UR)$. Тогда возможности УНКС по обеспечению качества связи и связанности между узлами в ситуациях $\gamma \in \Omega_\gamma^d$ будут определяться зависимостью $\Phi(x_\lambda, y_\lambda, UT, UR)$ от совокупности операторов $\alpha \in \Omega_\alpha^d$.

Полагая существование соответствующих вероятностных мер $P_\alpha^\gamma(dx_\lambda/y_\lambda)$, $P(dx_\lambda)$, уравнению (1) может быть поставлена соответствующая вероятностная модель УНКС между узлами: $[P_\alpha^\gamma(dx_\lambda/y_\lambda), P(dx_\lambda)]$. Поскольку мера $P(dx_\lambda)$ не является неотъемлемой характеристикой УНКС, ее можно учесть в ограничении, например, общего вида: $\eta_1 \leq \int_{dx_\lambda} \eta(dx_\lambda)P(dx_\lambda) \leq \eta_2$.

В рамках задачи повышения связанности узлов в качестве функционала $\Phi(x_\lambda, y_\lambda, UT, UR)$ целесообразно рассматривать текущую удельную пропускную способность (УПС), определяемую

$$C_t^{\alpha\gamma} [P_\alpha^\gamma(dx_\lambda/y_\lambda), \eta(dx_\lambda)] / \Delta f = \sup_{P(dx_\lambda) \in \Omega_x^p} I_{XY}^{\alpha\gamma},$$

где $I_{XY}^{\alpha\gamma}$ - информация связи сигналов на входе и выходе УНКС для совокупности $\alpha = (F_{UT}, F_{UR})$ в ситуации $\gamma = (x_\lambda, j_\beta, \theta t, \theta r, H, F_M)$. С учетом гауссовых мер текущая УПС

$$C_t^{\alpha\gamma} / \Delta f = \log_2(1 + \varepsilon_{\alpha\gamma}^{-2}), \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\alpha\gamma}^{-2}$ - отношение мощности сигнала к мощности помех и шумов для текущих значений $s_d \in \Omega_s^d$. Из (2) следует, что использование УНКС на физическом уровне является базовой основой для реализации экстремальных значений текущей скорости и точности передачи данных в критических ситуациях в среде между узлами.

Для анализа результатов теоретического обобщения рассмотрим простейший, но важный для приложений БСС критического применения на основе БЛА случай. В качестве управляемых узловых антенн будем рассматривать двух элементные антенные решетки с изотропными характеристиками направленности антенных элементов, размещаемых на расстоянии d_t и d_r для передающего и приемного узла соответственно. На рабочей длине волны λ в направлениях θt и θr фазовые сдвиги сигналов в антенных элементах узлов на

передающей и приемной сторонах будут определяться $\Omega t = 2\pi d_t \sin(\theta t) / \lambda$ и $\Omega r = 2\pi d_r \sin(\theta r) / \lambda$ соответственно. С учетом этого фазоры для передающей и приемной антенн будут определяться векторами $\alpha t(\Omega t) = [1 / \sqrt{2} \exp(-j\Omega t) / \sqrt{2}]^T$ и $\alpha r(\Omega r) = [1 / \sqrt{2} \exp(-j\Omega r) / \sqrt{2}]^T$ соответственно.

Аналогичным образом в среде передачи определим фазоры лучей, соответствующие направлениям ϕt передачи и приема ϕr : $v t(\Delta t) = [1 \exp(-j\Delta t)]^T$ и $v r(\Delta r) = [1 \exp(-j\Delta r)]^T$, где $\Delta t = 2\pi d_t \sin(\phi t) / \lambda$, а $\Delta r = 2\pi d_r \sin(\phi r) / \lambda$. Тогда для многолучевой беспроводной среды между узлами в случае k лучей канальная матрица будет определяться в виде:

$$H = \sum_k a_k v r(\Delta r_k) v t(\Delta t_k)^*$$

где Δt_k , Δr_k - фазовые сдвиги для k -го луча, характеризуемого направлениями излучения ϕt_k и приема ϕr_k ; a_k - комплексная гауссова случайная величина с нулевым средним и дисперсией σ_k^2 , характеризующая случайный коэффициент передачи k -го луча.

Пусть в направлении θj на антенну приемного узла дополнительно действует гауссова помеха j_β с нулевым средним и заданной дисперсией. Для антенны приемного узла фазор помехи $\alpha r(\Omega j) = [1 / \sqrt{2} \exp(-j\Omega j) / \sqrt{2}]^T$, где $\Omega j = 2\pi d_r \sin(\theta j) / \lambda$. Тогда сигнал на входе антенных элементов приемной антенны будет определяться вектором

$$u = H \alpha t(\Omega t) x_\lambda + \alpha r(\Omega j) j_\beta + n,$$

где $n = [n_1 \ n_2]^T$ - вектор гауссовых независимых шумов на входе антенных элементов приемной антенны.

Для удобства будем полагать, что шумы n_1 и n_2 независимы и имеют нулевые средние и единичную дисперсию. С учетом этого на выходе приемной антенны сигнал

$$y_\lambda = \alpha r(\Omega r)^* H \alpha t(\Omega t) x_\lambda + \alpha r(\Omega r)^* \alpha r(\Omega j) j_\beta + \alpha r(\Omega r)^* n.$$

Анализ двумерных распределений УПС (бит/с/Гц) в координатах θt и θr выполнялся по результатам усреднения 20 текущих значений. Числовые значения УПС соответствуют отношению мощности сигнала к мощности шумов, равному 10 дБ. Расстояние между антенными элементами на передающем и приемном узлах $d_t = d_r = d = \lambda / 2$. На рис. 1 приведено распределение УПС для однолучевой среды с направлениями излучения и приема луча $\phi t = 30^\circ$ и $\phi r = 30^\circ$ соответственно.

Для примера на рис. 2 представлено аналогичное распределение УПС в случае существенной многолучевости среды передачи. Распределение УПС для однолучевой среды и воздействия помехи в направлении $\theta j = -15^\circ$ представлено на рис. 3. Приведенные распределения УПС соответствуют отношению мощности помехи к мощности шумов, равному 40 дБ.

Из приведенных данных следует, что для рассматриваемой модели однолучевой среды и управления положением главного максимума характеристики направленности антенн передающего и приемного узлов можно обеспечивать приемлемые значения УПС для достаточно широкого диапазона направлений передачи и приема. Направления передачи, для которых отсутствует связь (темные области), обусловлены особенностями заданной

пространственной характеристики луча. При этом наличие существенной многолучевости в среде передачи между узлами вызывает снижение среднего уровня УПС и одновременное образование большого числа случайных локальных областей повышенной УПС.

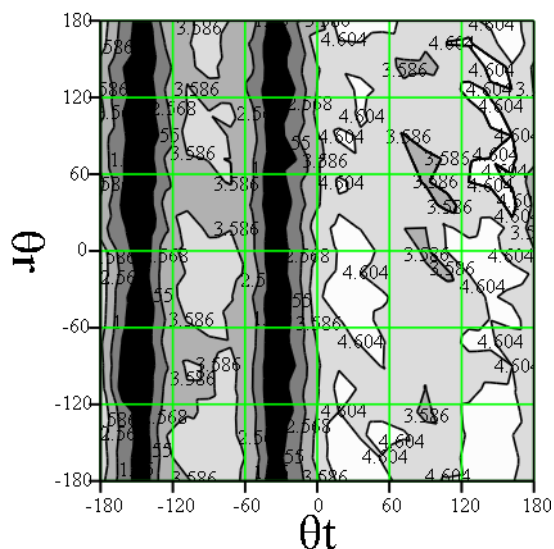


Рисунок 1 – Распределение УПС для однолучевой среды

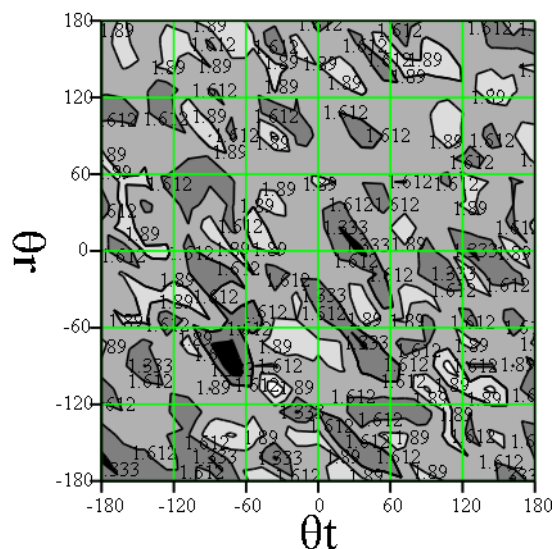


Рисунок 2 – Распределение УПС для многолучевой среды

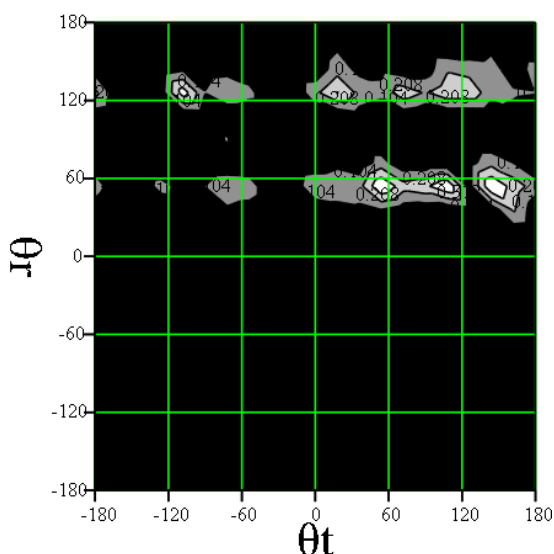


Рисунок 3 – Распределение УПС при воздействии помехи

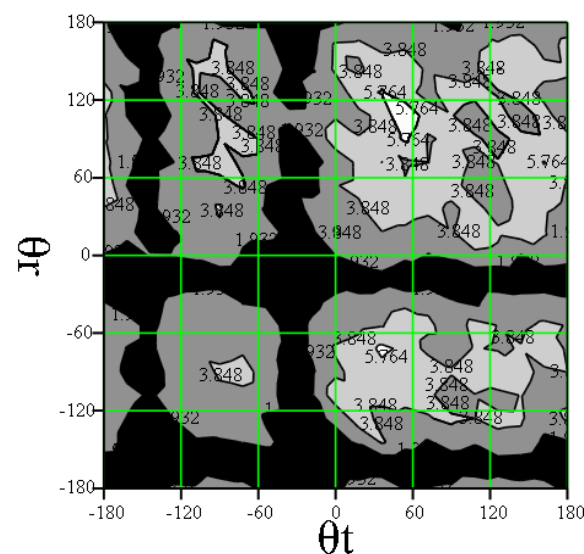


Рисунок 4 – Распределение УПС при воздействии помехи и управлении «нулем»

При появлении в среде помехи практически исключается возможность передачи во всей зоне (рис. 3). В этом случае соответствующее управление «нулем» характеристики направленности антенны приемного узла позволяет существенно расширить зону возможных направлений излучения и приема и восстановить УПС канала, обеспечив связность узлов в рассматриваемых условиях (рис. 4).

На рис. 5 и рис. 6 приведены распределения УПС, характерные для достаточно узких пучков из двух и пяти лучей в среде на передающем и приемном узлах в отсутствие помех. Сравнивая эти данные, можно сделать вывод о том, что увеличение числа лучей в пучках приводит к незначительному снижению средней УПС и расширению соответствующих областей связности узлов.

Появление помехи в этих ситуациях также приводит к существенному снижению УПС и связанности узлов, что иллюстрируется на рис. 7 и рис. 8 соответственно.

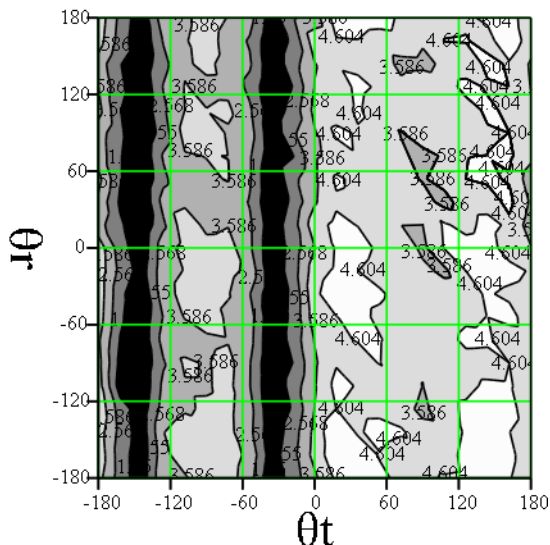


Рисунок 5 – Распределение УПС для передающих и приемных пучков из двух лучей

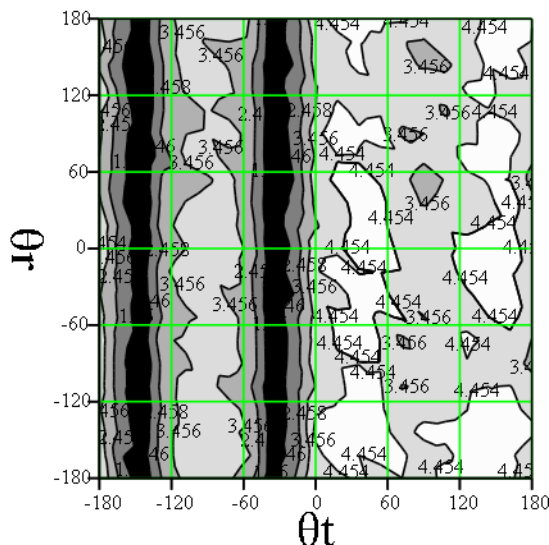


Рисунок 6 – Распределение УПС для передающих и приемных пучков из пяти лучей

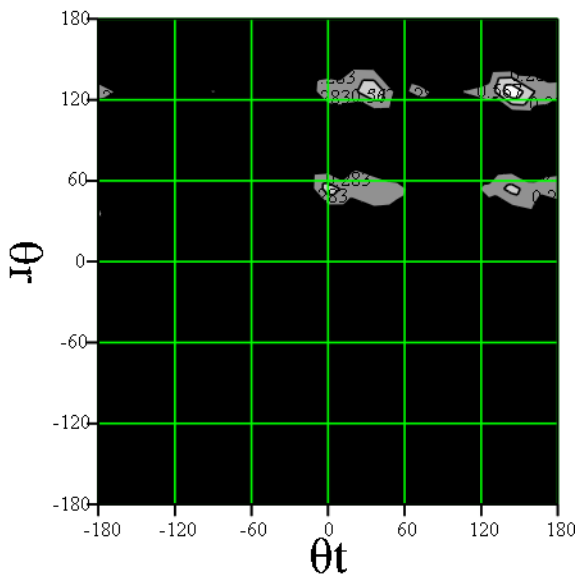


Рисунок 7 – Распределение УПС для пучков из двух лучей при воздействии помехи

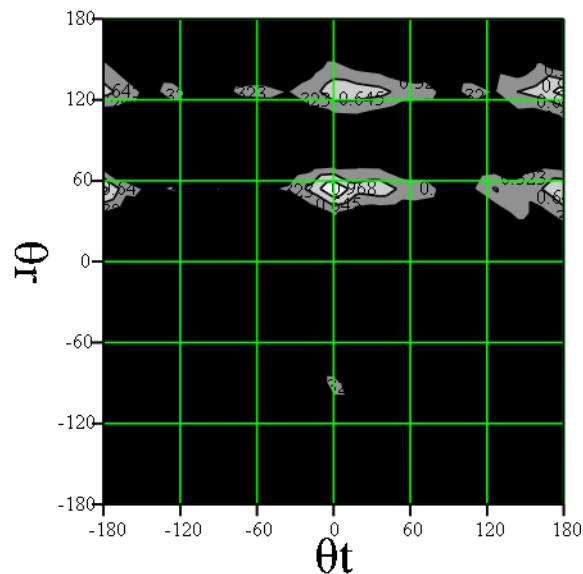


Рисунок 8 – Распределение УПС для пучков из пяти лучей при воздействии помехи

В этом случае УПС и связанность между узлами для определенных точечных направлений снижается до 0,3 и 0,6 бит/с/Гц соответственно. При этом рост числа лучей в пучках с учетом воздействия помехи приводит к незначительному относительному увеличению УПС в точечных локальных областях связанности.

Для этих ситуаций на рис. 9 и рис. 10 представлены распределения УПС и связанности двух узлов при управлении направлениями излучения и приема антенн на узлах с одновременным управлением «нулем» антенны принимающего узла.

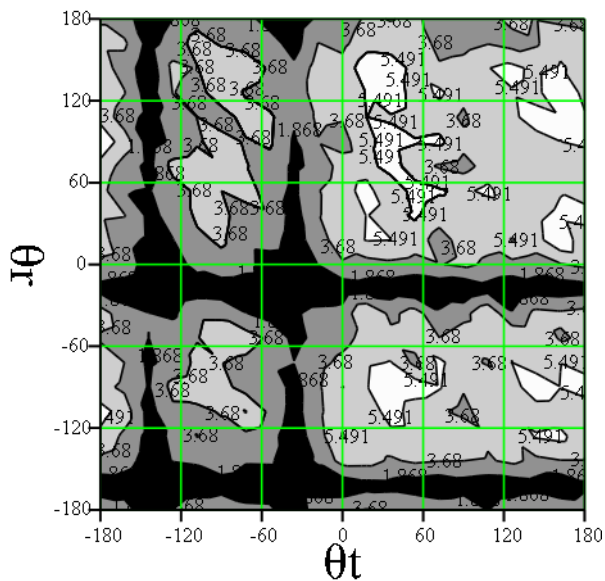


Рисунок 9 - Распределение УПС для пучков из двух лучей при воздействии помехи и управлении «нулем»

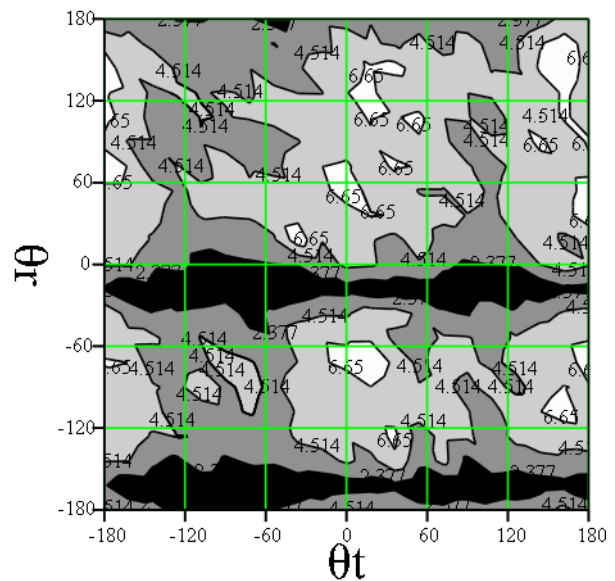


Рисунок 10 - Распределение УПС для пучков из пяти лучей при воздействии помехи и управлении «нулем»

Из приведенных данных следует, что управление «нулем» характеристики направленности антенны приемного узла оказывается эффективным способом увеличения УПС в случае многолучевости и воздействия помех, что позволяет существенно повысить связанность сети в сложной ситуации, характерной для БСС на основе БЛА в критических условиях. При этом результирующая область, в которой отсутствует связь (темная область) между узлами, сужается по мере увеличения числа лучей в беспроводной среде. Рассматриваемый способ повышения связанности БСС на основе использования на физическом уровне УНКС между узлами является более конструктивным по сравнению с известными способами, поскольку позволяют решать проблему при ограниченном частотно-энергетическом ресурсе узлов и заданных частотно-временных устройствах обработки на передающем и приемном узлах.

Выводы. Выполнено теоретическое обобщение УНКС на случай многолучевой среды между узлами с учетом воздействия внешних источников помех и исследованы возможности увеличения УПС физических каналов для повышения связанности БСС на основе использования БЛА в критических условиях применения. Полученные результаты позволяют исследовать возможности повышения связанности узлов в БСС при реализации на физическом уровне УНКС и используемых на узлах методов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования.

Получена частная модель УНКС с управляемыми двух элементными антеннами на передающем и приемном узлах. На основе данной модели исследованы возможности увеличения УПС каналов для характерных тестовых критических ситуаций в беспроводной среде. Показано, что при использовании УНКС существенно расширяются возможности по увеличению УПС и повышению на этой основе связанности между узлами без использования сложных технологий размещения узлов и поиска оптимальных маршрутов передачи информации между узлами. Технология УНКС может рассматриваться в качестве основы для новой стратегии повышения связанности БСС на основе использования БЛА в критических условиях при ограниченном частотно-энергетическом ресурсе узлов.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении уточнения рассмотренной частной модели многолучевой среды между узлами с учетом нестационарности пространственного положения и ориентации БЛА в БСС критического применения.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Стратегія розвитку вітчизняної авіаційної промисловості та цивільної авіації на період до 2020 року - Постанова КМУ від 27.12.2008.
2. Callaway E.H. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. –New York: CRC Press LLC, 2004. – 350 p.
3. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y and Cayirci E. “A survey on sensor networks”, IEEE Communications Magazine, Vol.40, No.8, 2002, pp. 102-114.
4. Садков А.Н. Анализ связанности сенсорной сети с коллективной передачей информации / А.Н. Садков, К.Г. Мишагин, В.А. Пастухов, А.Л. Умнов // Радиофизика. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2008, № 6, С. 70–76.
5. Поспелов Б.Б. Реализация концепции адаптируемого канала связи в авиационных радиолиниях / Б.Б. Поспелов // Радиотехника. – 2002. – Вып.128. – С. 197-205.
6. Поспелов Б.Б. Комплексная оптимизация беспроводных каналов связи / Б.Б. Поспелов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2010, №2. – С.162-167.

